

**CILINDRO ESPESSO CURVO SUBMETIDO A CARREGAMENTOS
COMBINADOS NO PLANO DE MOMENTO FLETOR, FORÇA NORMAL E
FORÇA CISALHANTE**

Marcelo Luiz Ligeiro Barbosa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Rio de Janeiro
Setembro de 2017

CILINDRO ESPESSO CURVO SUBMETIDO A CARREGAMENTOS
COMBINADOS NO PLANO DE MOMENTO FLETOR, FORÇA NORMAL E
FORÇA CISALHANTE

Marcelo Luiz Ligeiro Barbosa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Theodoro Antoun Netto, Ph.D.

Prof. Marcelo Igor Lourenço de Souza, D.Sc.

Dr. Rafael Familiar Solano, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2017

Barbosa, Marcelo Luiz Ligeiro

Cilindro Espesso Curvo Submetido a Carregamentos Combinados no Plano de Momento Fletor, Força Normal e Força Cisalhante / Marcelo Luiz Ligeiro Barbosa – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIX, 138 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 136-138.

1. Cilindro espesso curvo. 2. Deformação plástica. 3. Carregamentos combinados. I. Netto, Theodoro Antoun. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus.

À Petrobras pela oportunidade dada e liberação parcial do meu tempo para a realização desta dissertação.

Aos colegas de trabalho da Petrobras que atenderam às minhas solicitações de auxílio e esclarecimento de dúvidas.

Ao professor Theodoro Antoun Netto, por ter me orientado contribuindo com sugestões, críticas e orientações que foram fundamentais para a execução desse trabalho.

Aos colegas do Mestrado pelo companheirismo e pela troca de informações e vivência ao longo de todo o curso.

A minha esposa que me apoiou muito nos momentos mais difíceis e de desânimo, abrindo mão de horas de convívio sempre sorrindo e me incentivando. E ao meu enteadado por também abrir mão de horas de convívio.

Aos meus pais que me proporcionaram uma educação essencial que permitiu a realização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CILINDRO ESPESSO CURVO SUBMETIDO A CARREGAMENTOS
COMBINADOS NO PLANO DE MOMENTO FLETOR, FORÇA NORMAL E
FORÇA CISALHANTE

Marcelo Luiz Ligeiro Barbosa

Setembro/2017

Orientador: Theodoro Antoun Netto

Programa: Engenharia Oceânica

Tubo cilíndrico espesso curvo é muito utilizado na indústria de óleo e gás, principalmente nos conectores que ligam os dutos flexíveis aos equipamentos submarinos. Porém, não há uma padronização na indústria quanto ao critério de aceitação para eventuais deformações plásticas impostas pelas cargas dos dutos flexíveis no componente cilíndrico curvo do conector.

Este trabalho objetivou verificar o comportamento do cilindro espesso curvo quando submetido aos carregamentos combinados no plano de momento fletor, força normal e força cortante impostos pelo duto flexível, visando o estabelecimento de um critério de aceitação para as deformações plásticas.

A verificação do comportamento foi feita por análise numérica, utilizando o método de elementos finitos, através de modelagem tridimensional do cilindro.

Com este trabalho pode-se identificar os carregamentos que provocam deformações plásticas excessivas como também a perda da estabilidade estrutural no regime plástico e definir um critério de aceitação para as deformações plásticas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THICK-WALLED CURVED CILYNDER UNDER COMBINED TENSION, SHEAR
AND BENDING LOADS IN PLANE

Marcelo Luiz Ligeiro Barbosa

September/2017

Advisor: Theodoro Antoun Netto

Department: Ocean Engineering

Thick-walled curved cylinder, most used in oil and gas industry, is one of the most important component of the connector used to make and maintain a connection between flexible flowlines and subsea equipment. However, there is no a standard acceptance criteria for evaluation excessive yielding caused by the loads imposed by flexible flowlines in the curved cylinder component of the connector.

The objective of this study is to evaluate the thick-walled curved cylinder behavior under combined tension, shear and bending loads imposed by flexible flowlines in order to establish an acceptance criterion for plastic deformation. The behavior was evaluated by numerical analysis using the finite element method.

In this study, loads that caused excessive plastic deformations as well as structural stability lost were identified and an acceptance criterion for plastic deformations was defined.

Sumário

1	Introdução.....	1
2	Revisão Bibliográfica	4
2.1	Flexibilidade de um tubo curvado a 90°	4
2.2	Perda da estabilidade sob carregamento de flexão	5
2.3	Análise não linear e deformação plástica de tubo curvado a 90° sujeito a carregamento de flexão no plano	7
2.4	Resposta elasto-plástica não linear de um cotovelo a 90° de aço sob carregamento de flexão no plano e fora do plano	11
2.4.1	Resultados obtidos.....	12
2.4.1.1	Para carregamento de flexão no plano fechando o cotovelo	12
2.4.2	Para carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo	15
2.4.3	Para carregamento de flexão fora do plano	20
2.5	Efeito do comprimento de tubo reto conectado nas extremidades do cotovelo a 90° sob carregamento de flexão no plano	24
2.6	Carregamento plástico limite para cotovelo sob carregamento combinado de flexão no plano e torção.....	27
2.6.1	Algumas soluções relevantes de carregamentos limites.....	28
2.6.1.1	Carregamento de flexão pura no plano.....	28
2.6.1.2	Carregamento de torção pura	28
2.6.2	Resultados obtidos.....	29
2.6.2.1	Para o caso de carregamento de flexão pura no plano	29
2.6.2.2	Para o caso de carregamento torção pura	30
2.6.2.3	Para o caso de carregamento combinado de flexão no plano e torção	32
2.7	Perda da estabilidade no regime plástico de tubos sob carregamento de flexão e pressão interna	34

2.8 Critérios para colapso plástico - Característica do Colapso Plástico de Estruturas de Tubos Curvados.....	35
2.8.1 Critério twice static slope (TES)	36
2.8.2 Critério tangent intersection (TI).....	36
2.8.3 Resultados do estudo	37
2.9 Perda de estabilidade de coluna sob compressão [17] [18].....	39
3 Normas vigentes para verificação de integridade de conectores.....	41
4 Modelo numérico de elementos finitos	44
4.1 Modelo geométrico.....	44
4.2 Modelo de elementos finitos	45
4.3 Caracterização do material	46
4.4 Discretização	47
4.5 Carregamentos e condições de contorno	50
5 Mecanismos de deformação de conectores sujeitos a carregamentos combinados. 56	
5.1 Carregamento de momento fletor puro no plano.....	58
5.1.1 Momento fletor aplicado fechando a estrutura.....	58
5.1.1.1 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de três vezes o diâmetro externo ($R=3D_{ext}$).....	58
5.1.1.2 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de cinco vezes o diâmetro externo ($R=5D_{ext}$).....	61
5.1.2 Momento fletor aplicado abrindo a estrutura	63
5.1.2.1 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de três vezes o diâmetro externo ($R=3D_{ext}$).....	63
5.1.2.2 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de cinco vezes o diâmetro externo ($R=5D_{ext}$).....	67
5.2 Carregamentos de forças normal pura e cortante pura	73
5.2.1 Carregamento de força pura fechando a estrutura.....	73

5.2.1.1 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de três vezes o diâmetro externo ($R=3D_{ext}$).....	73
5.2.1.1.1 Força normal pura	73
5.2.1.1.2 Força cortante pura.....	75
5.2.1.2 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de cinco vezes o diâmetro externo ($R=5D_{ext}$).....	78
5.2.1.2.1 Força normal pura	78
5.2.1.2.2 Força cortante pura.....	80
5.2.2 Força pura aplicada abrindo a estrutura	83
5.2.2.1 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de três vezes o diâmetro externo ($R=3D_{ext}$).....	83
5.2.2.1.1 Força normal pura	83
5.2.2.1.2 Força cortante pura.....	85
5.2.2.2 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de cinco vezes o diâmetro externo ($R=5D_{ext}$).....	88
5.2.2.2.1 Força normal pura	88
5.2.2.2.2 Força cortante pura.....	90
5.3 Carregamentos combinados de momento fletor, força normal e força cortante.....	96
5.3.1 Comportamento da força resultante seguidora e sua reação no engaste conforme a estrutura se deforma.....	96
5.3.2 Carregamentos combinados fechando a estrutura	101
5.3.2.1 Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação principal máxima de 2%	101
5.3.2.1.1 Estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	101
5.3.2.1.2 Estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$	102
5.3.2.2 Influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade	104
5.3.2.2.1 Estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	104

5.3.2.2.2	Estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$	105
5.3.2.2.3	Resumo dos resultados da influência das forças normal e cortante no momento fletor para estruturas com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	106
5.3.3	Carregamentos combinados abrindo a estrutura	108
5.3.3.1	Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação principal máxima de 2%	108
5.3.3.1.1	Estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	108
5.3.3.1.2	Estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$	109
5.3.3.2	Influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade 111	
5.4	Efeito do histórico de carregamento.....	112
6	Estudo paramétrico.....	113
6.1	Carregamento de momento fletor puro	114
6.1.1	Fechando a estrutura.....	114
6.1.2	Abrindo a estrutura.....	117
6.1.3	Resumo do estudo paramétrico de carregamento de momento fletor puro no plano abrindo e fechando as estruturas.....	118
6.2	Carregamento de força normal pura	119
6.2.1	Fechando a estrutura.....	119
6.2.2	Abrindo a estrutura.....	120
6.3	Carregamento de força cortante pura	121
6.3.1	Fechando a estrutura.....	121
6.3.2	Abrindo a estrutura.....	122
6.4	Resumo do estudo paramétrico de carregamento de força pura no plano abrindo e fechando as estruturas.....	123
6.5	Carregamentos combinados	124
6.5.1	Fechando a estrutura.....	124
6.5.2	Abrindo a estrutura.....	128

7	Conclusões.....	130
8	Recomendações para trabalhos futuros	135
9	Referências	136

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de sistema submarino de produção com árvore de natal molhada, manifold e os dutos flexíveis conectando os equipamentos e a unidade de produção [1]	1
Figura 2 – Desenho genérico de um módulo de conexão vertical (MCV) mostrando o pescoço de ganso (<i>goose neck</i>) [2]	2
Figura 3 – Exemplo de módulo de conexão vertical conectado a um equipamento submarino [2].....	2
Figura 4 – Representação esquemática de (a) ovalização versus ponto de bifurcação e (b) mecanismo de ovalização devido à tensão [7].....	6
Figura 5 - (a) Geometria do tubo e (b) condição de carregamento em tubos inicialmente curvados [7]	6
Figura 6 - Configuração do tubo curvado [8]	7
Figura 7 – Localização dos pontos de integração utilizados na análise número por elementos finitos [8]	8
Figura 8 – Representação esquemática utilizada no estudo paramétrico com os carregamentos e condições de contorno [9]	12
Figura 9 – Flexibilidade elástica do cotovelo (Specimen 80) sob carregamento de flexão no plano fechando o cotovelo, comparando os resultados numéricos versus os experimentais (para valores de pressão p em MPa) [9].....	12
Figura 10 – Resposta do cotovelo sob carregamento de flexão no plano fechando o cotovelo para três níveis de pressões interna e duas relações diferentes de D/t [9]: (a) Elbow I ($D/t=90$) e (b) Elbow III ($D/t=20$) [9].....	13
Figura 11 – Ovalização da parede do cotovelo de parede grossa $D/t=20$ sob carregamento de flexão no plano fechando o cotovelo para diferentes níveis de pressões internas [9]	14
Figura 12 – Resposta do Elbow I ($D/t =90$) sob carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo e três níveis de pressão interna: (a) diagrama de momento-rotação e (b) diagrama de ovalização-rotação [9].....	16
Figura 13 – Resposta do Elbow III ($D/t =20$) sob carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo e três níveis de pressão interna: (a) diagrama de momento-rotação e (b) diagrama de ovalização-rotação [9].....	17

Figura 14 – Perda da estabilidade (Buckles) nos cotovelos sob carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo sem pressão interna: (a) Elbow I ($D/t = 90$) e (b) Elbow II ($D/t = 55$) [9]	18
Figura 15 – Perda da estabilidade (Buckles) nos cotovelos sob carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo com pressão interna: (a) Elbow I ($D/t = 90$) e (b) Elbow II ($D/t = 55$) [9]	19
Figura 16 – Forma da perda da estabilidade do cotovelo de parede fina Elbow I ($D/t = 90$) sob carregamento de flexão fora do plano: (a) para zero de pressão interna, e (b) para nível de pressão de 20% da P_y e (c) para nível de pressão de 40% da P_y [9]	20
Figura 17 – Seção (F) transversal do cotovelo sob carregamento de flexão fora do plano: (a) Elbow I ($D/t = 90$) e (b) Elbow II ($D/t = 20$) [9]	21
Figura 18 – Resposta dos cotovelos, Elbow I, II e III sob carregamento de flexão fora do plano: (a) diagrama de momento-rotação e (b) diagrama de ovalização-rotação [9]	22
Figura 19 – Resposta dos cotovelos, Elbow I, II e III sob carregamento de flexão fora do plano para pressão interna de 20% da P_y : (a) diagrama de momento-rotação e (b) diagrama de ovalização-rotação [9]	23
Figura 20 – Esquema do cotovelo com tubo reto conectado nas extremidades [10]	24
Figura 21 – Comparação das soluções limites por elementos finitos para carregamento de flexão no plano com soluções existentes (sem tubo reto conectado) – ($M^s_0 = 4r^2 t \sigma_0$ – sendo σ_0 tensão de escoamento) [10]	25
Figura 22 – Efeitos do comprimento de tubo reto conectado nas extremidades do cotovelo no carregamento limite de flexão no plano. O momento é normalizado com relação a: (a) $M^s_0 = 4r^2 t \sigma_0$ e (b) com a solução de Calladine [11] - $M_0 = 4r^2 t \sigma_0 (0.935 \lambda^{2/3})$ – sendo σ_0 tensão de escoamento [10]	26
Figura 23 - Ilustração esquemática do cotovelo a 90° [12]	27
Figura 24 – Comparação entre as soluções obtidas por elementos finitos para carregamento de flexão pura no plano: (a) com a equação (1) e (b) com a equação (3) [12]	29
Figura 25 - Comparação dos resultados das análises por elementos finitos para carregamento de torção pura com algumas equações propostas: (a) com a equação (2), (b) com a equação (4) e (c) com a equação (5) [12]	30
Figura 26 – Padrão de forças atuantes para cotovelo sob carregamento de torção pura com tubo reto conectado nas extremidades [12]	31

Figura 27 – Deformações e suas formas da seção transversal do cotovelo (seção A-A) para carregamentos combinados de flexão no plano e torsão: (a) carregamento de flexão no plano fechando o cotovelo com torção e (b) carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo com torção [12].....	32
Figura 28 – Curva de interação entre os carregamentos de flexão e torção para o caso M_B - M_T : (a) carregamento combinado de torsão e flexão no plano fechando o cotovelo e (b) carregamento combinado de torsão e flexão no plano abrindo o cotovelo [12].....	33
Figura 29 – Curva de interação entre os carregamentos de flexão e torção para o caso M_T - M_B : (a) carregamento combinado de torsão e flexão no plano fechando o cotovelo e (b) carregamento combinado de torsão e flexão no plano abrindo o cotovelo [12].....	33
Figura 30- (a) Critério <i>twice elastic slope</i> , TES; (b) critério <i>tangent intersection</i> , TI [16]	36
Figura 31- Característica da curva momento-rotação obtida na análise pela teoria de grande deslocamento [16].....	38
Figura 32 – Exemplo de caso no qual a força passa por um ponto fixo [17]	39
Figura 33 – Modelo geométrico tridimensional utilizado nas análises numéricas.....	44
Figura 34 – Modelo de material utilizado nas análises numéricas	46
Figura 35 – Análise de sensibilidade de malha mostrando a convergência dos resultados para malhas diferentes	47
Figura 36 – Malha de elementos finitos para o modelo de cilindro curvo com 6” de diâmetro interno, 1,25” de espessura de parede e raio de curvatura de três vezes o diâmetro externo ($R=25,50''$) – malha 4 da análise de sensibilidade	48
Figura 37 – Comparação entre as malhas com elementos SOLID185 e SOLID186 mostrando que os resultados são quase idênticos para fechamento da estrutura.....	49
Figura 38 – Comparação entre as malhas com elementos SOLID185 e SOLID186 mostrando que os resultados são quase idênticos para abertura da estrutura	49
Figura 39 – Carregamentos e condições de contorno para fechamento da estrutura	51
Figura 40 – Carregamentos e condições de contorno para abertura da estrutura	53
Figura 41 – Aplicação de carregamento incremental	55
Figura 42 – Regiões de início de escoamento em vermelho	58
Figura 43 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2% ..	59
Figura 44 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes até 10%	59

Figura 45 – Ovalização da seção central da estrutura onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural	60
Figura 46 – Comportamento da estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ submetida ao carregamento de momento fletor puro fechando em função da rotação da extremidade livre.....	61
Figura 47 – Comportamento da estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$ submetida ao carregamento de momento fletor puro fechando em função da rotação da extremidade livre.....	62
Figura 48 – Regiões de início de escoamento em vermelho	63
Figura 49 – Distribuição das deformações principais máximas trativas até 2%	64
Figura 50 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes até 10%	64
Figura 51 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes ao longo da espessura da parede nos pontos de deformações plásticas equivalentes de 10%	65
Figura 52 – Deformada na região próxima ao engaste, na qual o ocorreu a perda da estabilidade estrutural	66
Figura 53 – Comportamento da estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ submetida ao carregamento de momento fletor puro abrindo em função da deformação equivalente plástica.....	66
Figura 54 – Distribuição das deformações principais máximas até 2%.....	67
Figura 55 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes até 10%	68
Figura 56 – Deformada da estrutura na perda da estabilidade	69
Figura 57 – Comportamento da estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$ submetida ao carregamento de momento fletor puro abrindo em função da deformação plástica equivalente.....	70
Figura 58 – Região de início do escoamento em vermelho.....	73
Figura 59 – Distribuição das deformações principais máximas trativas até 2%	74
Figura 60 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural	75
Figura 61 – Região de início do escoamento em vermelho.....	75
Figura 62 – Distribuição das deformações principais máximas trativas até 2%	76
Figura 63 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 10%.....	77
Figura 64 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 12%.....	77
Figura 65 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade.....	78
Figura 66 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2% ..	79

Figura 67 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes até 10%	79
Figura 68 – Região onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural.....	80
Figura 69 – Região de início de escoamento em vermelho	80
Figura 70 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2% ..	81
Figura 71 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes até 10%	81
Figura 72 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural	82
Figura 73 – Região de início do escoamento em vermelho.....	83
Figura 74 – Distribuição das deformações principais máximas trativas até 2%	84
Figura 75 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural	85
Figura 76 – Região de início do escoamento em vermelho.....	85
Figura 77 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2% ..	86
Figura 78 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 10%	86
Figura 79 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 12%	87
Figura 80 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural	87
Figura 81 – Região de início do escoamento em vermelho.....	88
Figura 82 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2% ..	89
Figura 83 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural	90
Figura 84 – Região de início do escoamento em vermelho.....	90
Figura 85 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2% ..	91
Figura 86 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 10%	91
Figura 87 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 12%	92
Figura 88 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade.....	92
Figura 89 – Curvas de F_{ra}/F_o em relação à deformação plástica equivalente para as forças normal e cortante puras fechando a estrutura para raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$, passando pela perda da estabilidade estrutural	94
Figura 90 – Curvas de F_{ra}/F_o em relação à deformação plástica equivalente para as forças normal e cortante puras abrindo a estrutura para raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$, passando pela perda da estabilidade estrutural	95
Figura 91 – Comportamento da força resultante aplicada e suas componentes - força normal pura ($\varphi = -30^\circ$)	97
Figura 92 – Comportamento da força resultante aplicada e suas componentes - força cortante pura ($\varphi = -120^\circ$)	98

Figura 93 – Comportamento da força resultante aplicada e suas componentes - força cortante pura ($\varphi = 60^\circ$)	99
Figura 94 – Comportamento da força resultante aplicada e suas componentes - força normal pura ($\varphi = 150^\circ$).....	100
Figura 95 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para deformação principal máxima de 2% para estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	101
Figura 96 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para deformação principal máxima de 2% para estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$	102
Figura 97 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade estrutural para estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	104
Figura 98 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade estrutural para estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$	105
Figura 99 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para $V=0,50xN$ para fechamento da estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	107
Figura 100 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para deformação principal máxima de 2% para estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	108
Figura 101 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para deformação principal máxima de 2% para estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$	109
Figura 102 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para $V=0,50xN$ para abertura da estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	110
Figura 103 – Carregamento máximo de momento fletor puro no plano fechando a estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$, em função de λ , o qual a estrutura é capaz de suportar segundo critério de falha de deformação principal máxima de 2% e o limite de estabilidade estrutural	115
Figura 104 – Carregamento máximo de momento fletor puro no plano fechando a estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$, em função de λ , o qual a estrutura é capaz de suportar segundo critério de falha de deformação principal máxima de 2% e o limite de estabilidade estrutural	116
Figura 105 - Carregamentos máximos de momentos fletores puros no plano abrindo as estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$, em função de λ , os quais as estruturas são capazes de suportar segundo os critérios de falha de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural	117

Figura 106 – Carregamentos máximos de forças normais puras no plano fechando as estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$, em função de λ , os quais as estruturas são capazes de suportar segundo os critérios de falha de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural	119
Figura 107 – Carregamentos máximos de forças normais puras no plano abrindo as estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$, em função de λ , os quais as estruturas são capazes de suportar segundo os critérios de falha de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural	120
Figura 108 – Carregamentos máximos de forças cortantes puras no plano fechando as estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$, em função de λ , os quais as estruturas são capazes de suportar segundo os critérios de falha de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural	121
Figura 109 – Carregamentos máximos de forças cortantes puras no plano abrindo as estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$, em função de λ , os quais as estruturas são capazes de suportar segundo os critérios de falha de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural	122
Figura 110 – Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação máxima principal de 2% no fechamento para estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	124
Figura 111 - Influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade no fechamento para estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	125
Figura 112 – Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação máxima principal de 2% no fechamento para estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$	126
Figura 113 - Influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade no fechamento para estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$	127
Figura 114 – Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação máxima principal de 2% na abertura para estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$	128
Figura 115 – Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação máxima principal de 2% na abertura para estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$	129

Lista de Tabelas

Tabela 1- Resultados da análise não linear e deformação plástica nas proximidades da seção central do tubo curvado a 90° sujeito ao carregamento flexão no plano - no regime elástico [8]	9
Tabela 2 - Resultados da análise não linear e deformação plástica nas proximidades da seção central do tubo curvado a 90° sujeito ao carregamento de flexão no plano - no regime plástico [8]	10
Tabela 3 – Dimensões dos cotovelos I, II e III utilizados no estudo paramétrico [9]	11
Tabela 4 – Parâmetros geométricos dos cotovelos analisados [12].....	27
Tabela 5 – Relações entre as forças normal e cortante e o ângulo de direção da força resultante para fechamento da estrutura	52
Tabela 6 – Relações entre as forças normal e cortante e o ângulo de direção da força resultante para abertura da estrutura	53
Tabela 7 – Resultados para carregamento de momento fletor puro no plano	71
Tabela 8 – Deformações plásticas equivalentes na perda da estabilidade estrutural para carregamento de momento fletor puro no plano.....	72
Tabela 9 – Resultados para carregamentos de forças normal e cortante puras no plano	93
Tabela 10 – Deformações plásticas equivalentes na perda da estabilidade para carregamentos de forças normal e cortante puras no plano.....	94
Tabela 11 – Geometrias utilizadas no estudo paramétrico	113

1 Introdução

Na produção *offshore* de Óleo e Gás são utilizados equipamentos submarinos (árvore de natal molhada, manifold, *pipeline end termination* (PLET) etc), os quais são instalados no leito marinho com profundidades que podem superar atualmente os 2500 metros. O transporte do fluido produzido entre os equipamentos e até a unidade de processamento *offshore* é realizado por dutos que estão conectados nos equipamentos submarinos, por intermédio de conectores específicos para tal. Os dutos podem ser, de maneira geral, rígidos ou flexíveis.

Para conexão de duto flexível ao equipamento submarino é utilizado um conector chamado de módulo de conexão vertical (MCV).

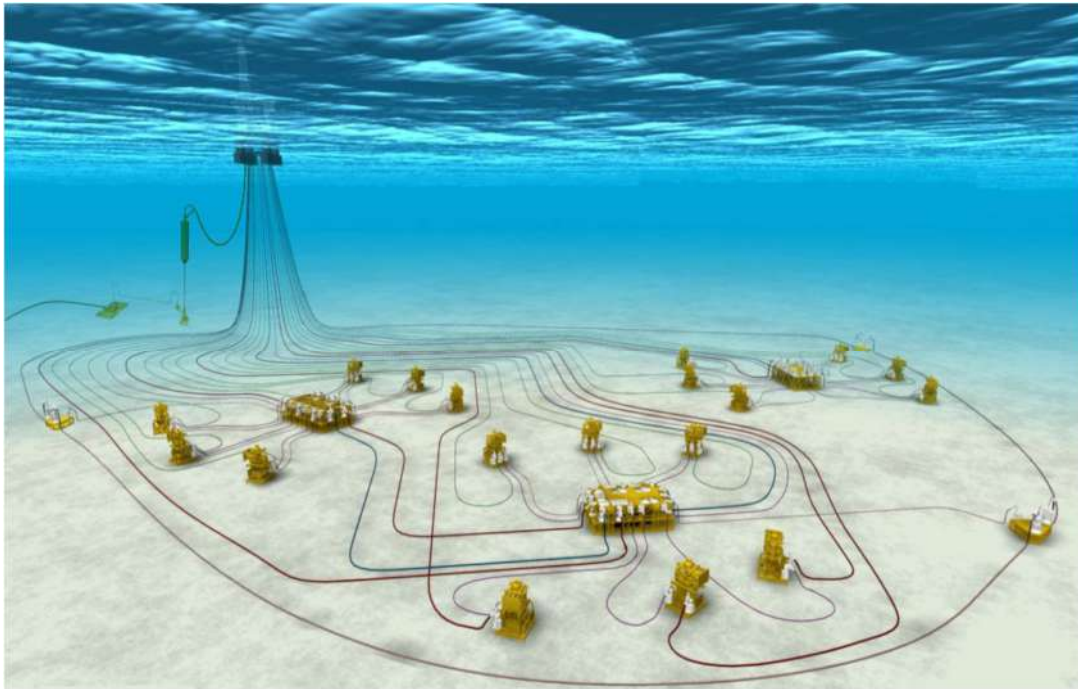


Figura 1 - Exemplo de sistema submarino de produção com árvore de natal molhada, manifold e os dutos flexíveis conectando os equipamentos e a unidade de produção [1]

O módulo de conexão vertical é basicamente composto de pescoço de ganso (*goose neck*), conector e sistema guia. O componente responsável por fixar o duto flexível no MCV é o pescoço de ganso, o qual é uma estrutura cilíndrica curva.

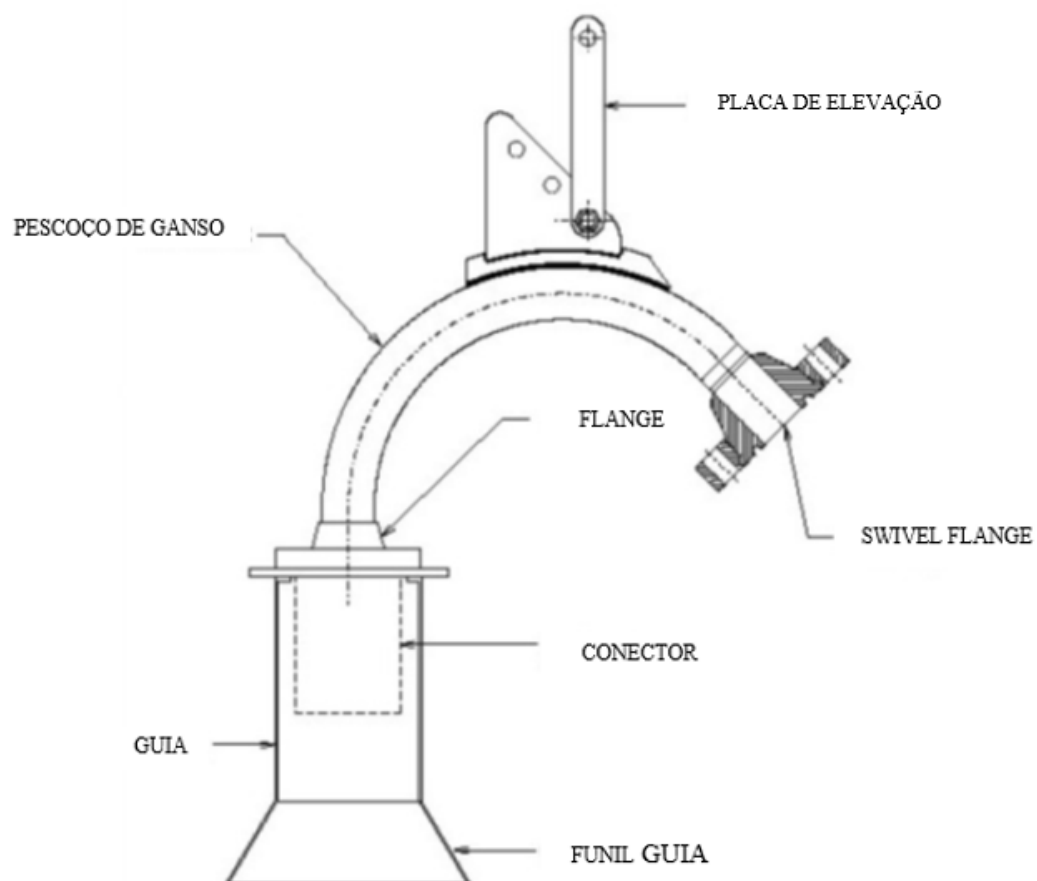


Figura 2 – Desenho genérico de um módulo de conexão vertical (MCV) mostrando o pescoço de ganso (*goose neck*) [2]

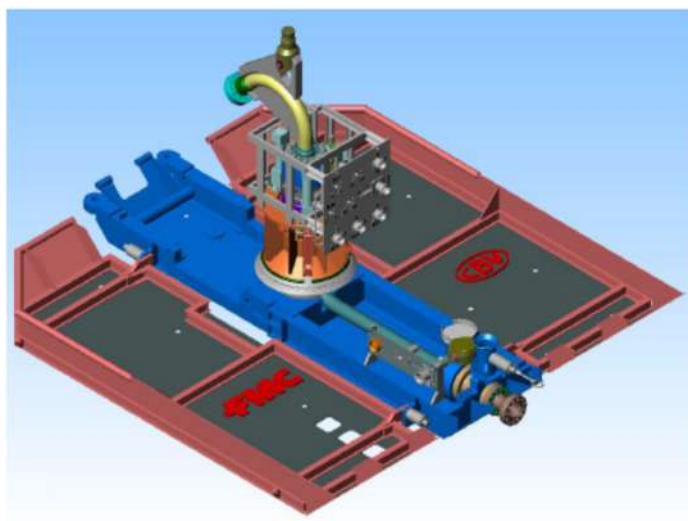


Figura 3 – Exemplo de módulo de conexão vertical conectado a um equipamento submarino [2]

Como o pescoço de ganso é o responsável pela conexão do duto flexível no módulo de conexão vertical, as cargas impostas pelo duto flexível conectado no flange do pescoço de ganso são transferidas para o restante do MCV e para o equipamento submarino no qual o MCV esteja conectado por intermédio do pescoço de ganso. Para evitar danos ao equipamento submarino, aos demais componentes do MCV, ao duto flexível e qualquer outro elemento estrutural, o pescoço de ganso deve ser o componente de menor resistência estrutural, ou seja, deformações excessivas devem ocorrer no pescoço de ganso e caso haja ruptura que ocorra no pescoço de ganso.

Com profundidades cada vez maiores de instalação de equipamentos submarinos, com a necessidade de isolamento térmico dos dutos flexíveis, maior resistência do duto flexível ao colapso devido à pressão externa etc, as cargas impostas pelo duto flexível no pescoço de ganso têm aumentado significativamente e demandado uma análise estrutural mais detalhada antes de se proceder com a instalação do MCV. Isto para garantir que não haverá deformação plástica excessiva que leve ao colapso do pescoço de ganso.

Como não há uma norma internacional específica para tratar do cálculo de tensões e deformações limites no pescoço de ganso, é comum a utilização das normas internacionais ASME, ISO e API para cálculo das tensões e deformações aceitáveis bem como outros métodos específicos utilizados por cada fabricante do equipamento. Com isto, não há um padrão de verificação da resistência estrutural que possa ser utilizado por todos os fabricantes do equipamento e pela operadora responsável pela integridade do equipamento. Entretanto, um dos critérios de aceitação mais utilizado para as deformações excessivas é o da norma ISO 13628-7 [3], o qual estabelece limites para as deformações principal máxima a e plástica equivalente para as análises elasto-plásticas.

O objetivo deste trabalho é determinar os carregamentos máximos, combinados ou não, de momento fletor, força normal e força cisalhante que o pescoço de ganso seja capaz de suportar sem que ocorra deformação maior do que a permitida pela norma ISO 13628-7 [3], ou seja, a deformação principal máxima não seja superior a 2% como também não ocorra a perda da estabilidade estrutural do pescoço de ganso.

A determinação dos carregamentos combinados máximos é realizada por intermédio de análises numéricas utilizando o método dos elementos finitos através do software comercial ANSYS versão 16.2 [4].

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Flexibilidade de um tubo curvado a 90°

De acordo com Mourad [5] quando um carregamento externo é aplicado em uma das extremidades de um tubo curvado a 90° (cotovelo) a sua seção transversal tende a se deformar significativamente no plano e fora do plano da curva. Esse comportamento é uma característica da flexão do tubo e principalmente da sua geometria curva que o torna mais flexível do que um tubo reto. Essa flexibilidade é também acompanhada por tensões e deformações que são maiores do que aquelas presentes em um tubo reto de mesmo dimensional e com o mesmo material do tubo curvo sob as mesmas condições de carregamento. Por esse motivo, tubos curvos são considerados críticos.

Para o propósito de projeto e qualificação de um tubo curvo estrutural é importante ter uma estimativa confiável da sua capacidade de suportar carregamento juntamente ao entendimento do seu comportamento elasto-plástico sob diferentes tipos de carregamentos. É importante também ter uma estimativa confiável dos carregamentos limites além dos quais a estrutura de tubo curvado experimenta deformações plásticas excessivas, as quais tendem a aumentar desproporcionalmente sob a influência de pequenos incrementos de carregamento, conduzindo eventualmente a falha, quando a porção elástica da estrutura seja insuficiente para resistir ao carregamento.

Mourad [5] cita no seu trabalho que fora demonstrado experimentalmente por Bantlin [6] que um tubo curvado sob carregamento se comporta diferentemente do que o previsto pela teoria de viga.

2.2 Perda da estabilidade sob carregamento de flexão

Segundo Karamanos [7] a principal característica observada em um tubo sob flexão é a ovalização da sua seção transversal (Figura 4 – (a)) devido as componentes das tensões σ_v , conforme mostrado na Figura 4 – (b).

A ovalização gera perda de rigidez manifestando-se na forma de um ponto de instabilidade limite, referenciado como “ovalization instability”. Além disso, aumentando a tensão axial no lado comprimido a ovalização pode causar instabilidade em forma de ondas longitudinais, conhecidas como “wrinkles”, usualmente formadas antes que um momento limite seja atingido (Figura 4 – (a)).

Resultados de simulações numéricas por elementos finitos foram obtidos para tubos de parede fina ($r/t = 120$) para examinar a “ovalization instability” e a “bifurcation instability”, para material no regime elástico (sem considerar efeitos de plasticidade), com as seguintes propriedades: módulo de elasticidade de 29.000 Ksi e coeficiente de Poisson de 0.3.

Conforme descrito por Karamanos [7], os resultados de simulações verificaram observações de pesquisadores anteriores que a capacidade elástica de tubos sob flexão no plano depende de dois modos de instabilidade: ovalização e bifurcação, os quais interagem um com o outro fortemente.

Os resultados [7] demonstraram também que pequenos valores de curvatura inicial do tubo, vide Figura 5 , têm efeitos significantes na resposta do tubo.

A ovalização da seção do tubo quando analisada sem a influência da bifurcação, mostrou ter efeito imediato na capacidade de momento e mudanças significativas das curvaturas locais no entorno do tubo.

A presença de curvatura inicial na direção da flexão (momento de fechamento) faz com que o mecanismo de ovalização seja dominante.

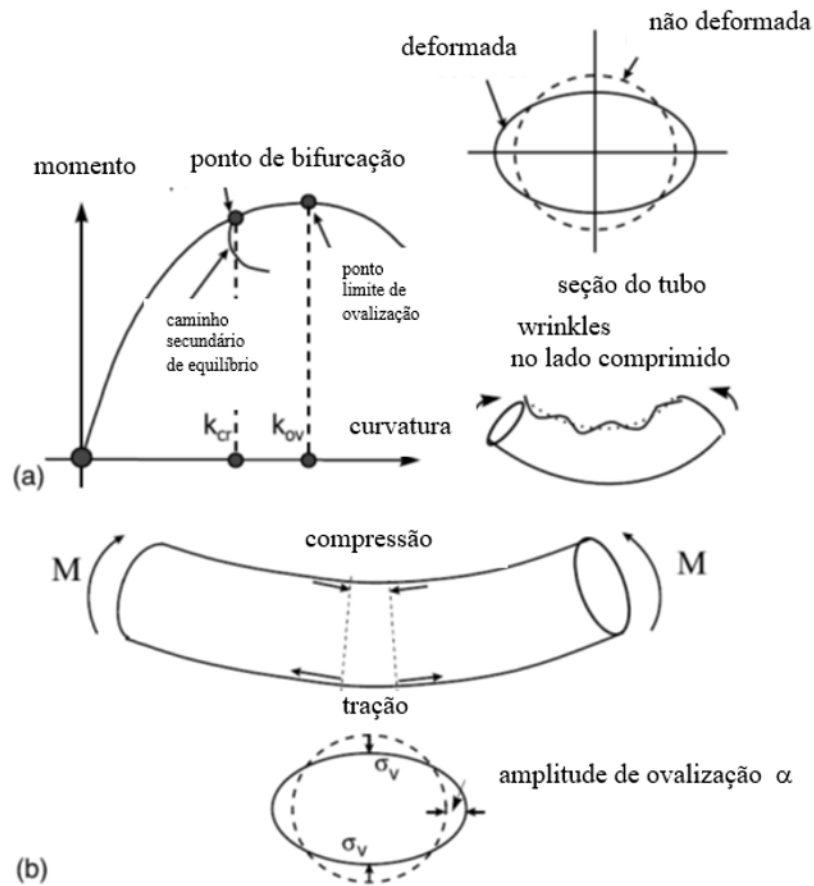


Figura 4 – Representação esquemática de (a) ovalização versus ponto de bifurcação e (b) mecanismo de ovalização devido à tensão [7]

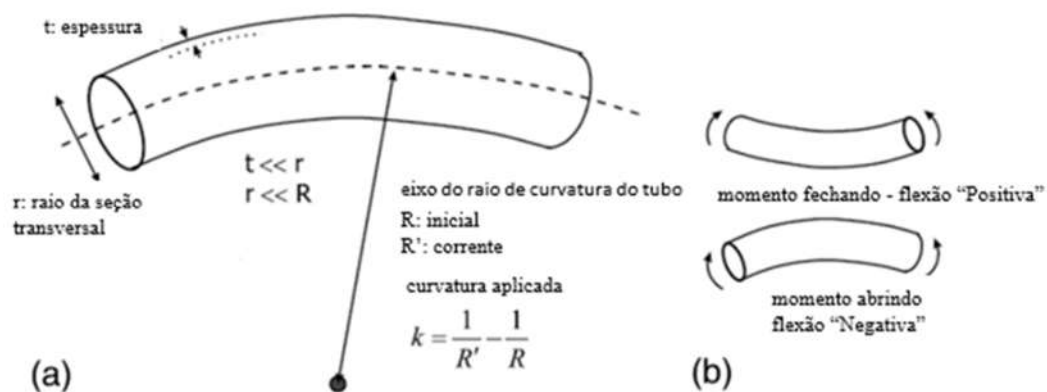


Figura 5 - (a) Geometria do tubo e (b) condição de carregamento em tubos inicialmente curvados [7]

2.3 Análise não linear e deformação plástica de tubo curvado a 90° sujeito a carregamento de flexão no plano

Shalaby [8] analisou a distribuição da deformação plástica em um tubo curvado a 90° sob carregamento flexão no plano, com a configuração ilustrada na Figura 6, por um procedimento numérico utilizando o método de elementos finitos.

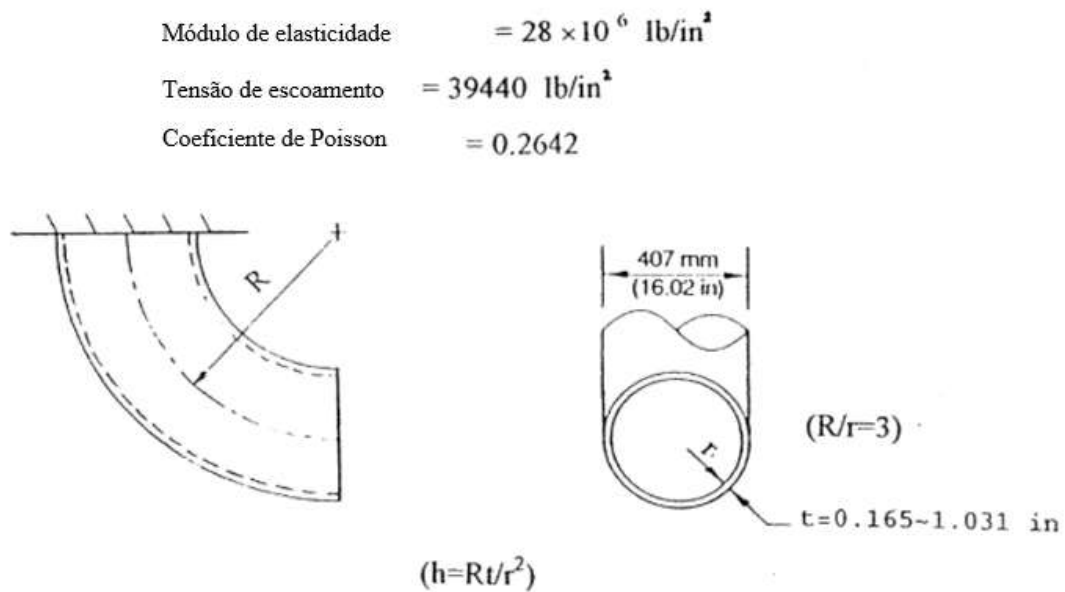


Figura 6 - Configuração do tubo curvado [8]

O modelo de elementos finitos consistiu em seis modos de Fourier com 20 pontos de integração ao redor da seção transversal, em adição utilizou-se sete pontos de integração ao longo da espessura, conforme mostrado na Figura 7.

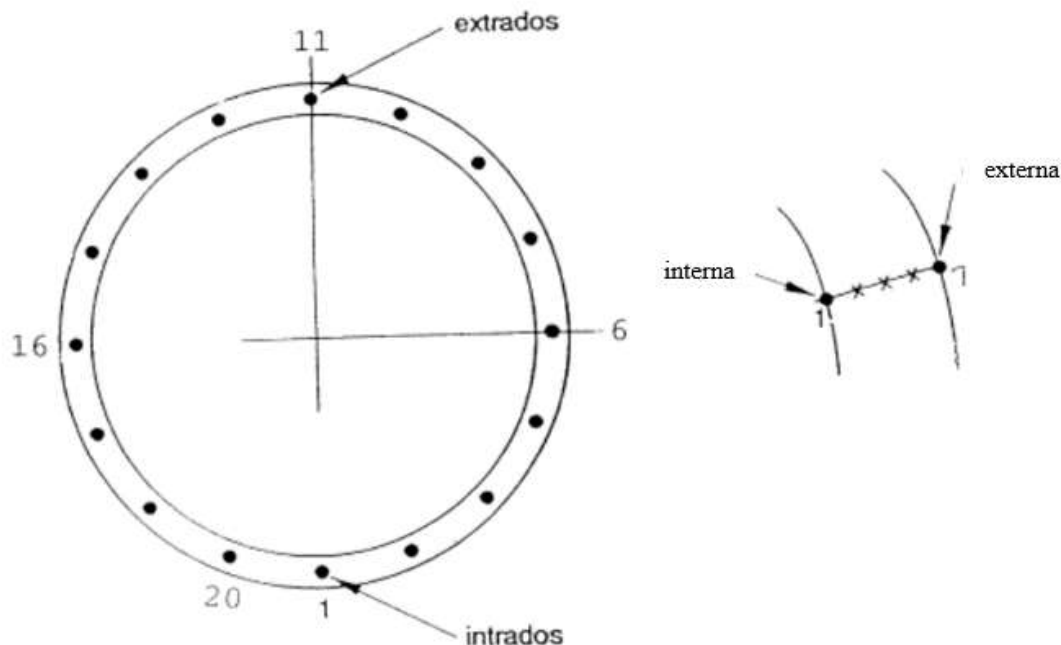


Figura 7 – Localização dos pontos de integração utilizados na análise número por elementos finitos [8]

As distribuições das tensões e deformações através da espessura e nas proximidades da seção central do cotovelo foram estudadas do início do escoamento até a perda da estabilidade, sem considerar os efeitos dos diferentes tipos de restrições de extremidades, a fim de verificar o desenvolvimento do escoamento através da espessura sob carregamento de flexão no plano abrindo e fechando o cotovelo.

O carregamento na extremidade livre foi aplicado até uma magnitude que fosse capaz de produzir colapso plástico ou a perda da estabilidade. A análise de grande deslocamento foi controlada por rotação, isto é, incrementos de rotação foram prescritos na extremidade livre ao invés de incrementos de carregamento de flexão, uma vez que era esperado um colapso plástico instável.

A análise considerou um material elástico-perfeitamente plástico, desta forma a tensão de Von Mises ao atingir a tensão de escoamento permaneceu constante com o aumento do carregamento.

As tabelas a seguir listam os resultados [8] obtidos da análise tanto no regime elástico quanto no plástico.

Tabela 1- Resultados da análise não linear e deformação plástica nas proximidades da seção central do tubo curvado a 90° sujeito ao carregamento flexão no plano - no regime elástico [8]

Condição da seção central	Resultado
Comportamento sob carregamento de flexão no plano (tanto abrindo quanto fechando).	O comportamento foi o mesmo tanto para abertura quanto para fechamento, ou seja, as distribuições de tensões e deformações foram as mesmas em ambos casos, somente trocando de sinal.
Início do escoamento.	<p>✓ Começou a escoar no mesmo valor de carregamento de flexão aplicado tanto para abertura quanto para fechamento.</p> <p>✓ Para cotovelo de parede fina, a localização do ponto de máxima deformação no início do escoamento foi na superfície interna do <i>crown</i> do cotovelo tanto na abertura quanto para o fechamento devido à dominância da ovalização da seção transversal do cotovelo.</p>

Tabela 2 - Resultados da análise não linear e deformação plástica nas proximidades da seção central do tubo curvado a 90° sujeito ao carregamento de flexão no plano - no regime plástico [8]

Condição da seção central	Resultado
Comportamento sob carregamento de flexão no plano (tanto abrindo quanto fechamento).	Devido ao grande deslocamento envolvido, o comportamento foi diferente. No caso do carregamento flexão abrindo o modo de deslocamento associado causa um aumento da rigidez geométrica o que permite que deslocamentos maiores aconteçam antes da perda da estabilidade.
Na perda da estabilidade.	<p>✓ O carregamento de flexão foi em torno de duas vezes o carregamento que iniciou o escoamento no fechamento, enquanto que na abertura foi um pouco acima de nove vezes.</p> <p>✓ A máxima deformação plástica na perda da estabilidade ocorreu na superfície interna do <i>crown</i> do cotovelo no fechamento, enquanto que para a abertura ocorreu na superfície externa do intrados.</p> <p>✓ Na abertura ocorreu a plastificação completa da parede de toda a seção transversal ao longo do cotovelo antes da perda da estabilidade.</p> <p>✓ No fechamento a plastificação completa da parede concentrou-se em torno do <i>crown</i> do cotovelo. Entretanto, não houve plastificação completa da seção transversal antes da perda da estabilidade.</p>
O cotovelo pode resistir a carregamento flexão mesmo com diversos pontos ao longo da seção transversal completamente plastificados em toda a espessura.	

2.4 Resposta elasto-plástica não linear de um cotovelo a 90° de aço sob carregamento de flexão no plano e fora do plano

Karamanos [9] examinou a resposta elasto-plástica não linear de um cotovelo de 90° pressurizado internamente e sob carregamento de flexão no plano e fora do plano, utilizando o método dos elementos finitos. Os resultados numéricos obtiveram êxito quando comparados com medições experimentais.

O trabalho também apresentou um estudo paramétrico, dirigido para investigação dos efeitos da relação diâmetro-espessura e níveis de pressões moderados na capacidade última de carregamento de flexão do cotovelo de 90°, visando os modos de falha (perda da estabilidade local ou achatamento da seção transversal) e capacidade de carregamento de flexão.

Dados do cotovelo referenciado no estudo [9] como Specimen 80: diâmetro externo 160 mm e espessura média de 2,9 mm após o dobramento de um tubo reto por indução (valor médio $D/t = 55$ e valor nominal $D/t=53$). Limite de escoamento (σ_y) do material de 380 MPa e tensão última de 527 MPa. O modelo de material utilizado foi sem encruamento até 2% de deformação nominal e com encruamento linear a partir dos 2% até a tensão última que corresponde a 15% de deformação de engenharia.

A Tabela 3 mostra as dimensões dos cotovelos utilizados no estudo paramétrico e a Figura 8 a representação esquemática utilizada no estudo paramétrico com os carregamentos e condições de contorno.

Tabela 3 – Dimensões dos cotovelos I, II e III utilizados no estudo paramétrico [9]

		Diâmetro externo	Espessura	Raio de curvatura	Comprimento da parte reta
	D/t	D (mm)	t (mm)	R (mm)	L (mm)
Elbow I	90	270	3.0	480	1620
Elbow II	55	165	3.0	480	990
Elbow III	20	165	8.25	480	990

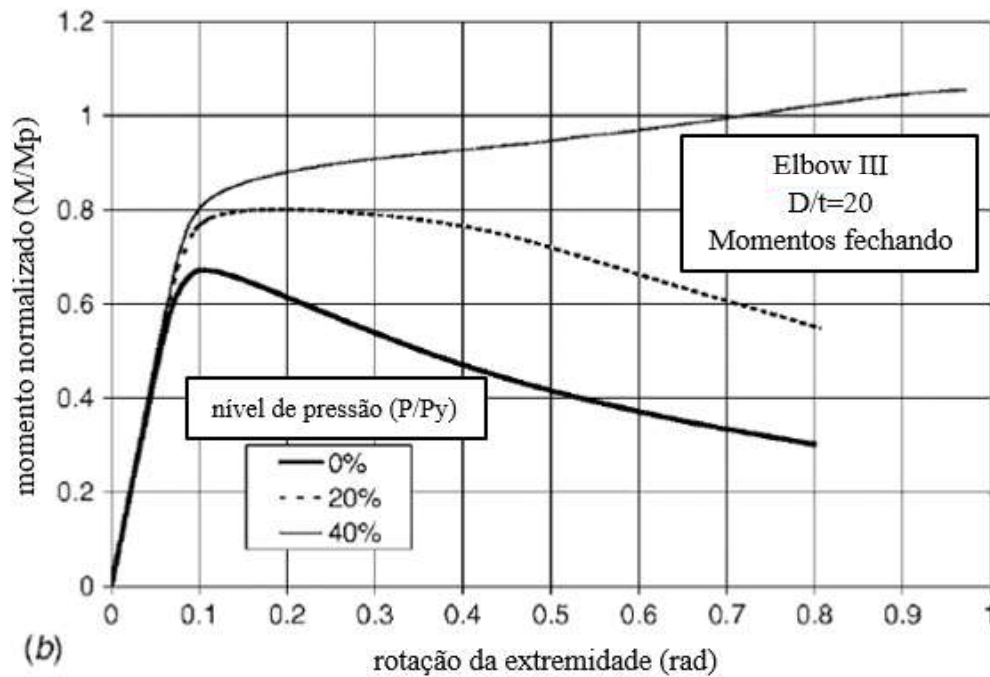


Figura 10 – Resposta do cotovelo sob carregamento de flexão no plano fechando o cotovelo para três níveis de pressões interna e duas relações diferentes de D/t [9]: (a) Elbow I (D/t=90) e (b) Elbow III (D/t=20) [9]

Pode-se observar na Figura 10 que a presença de pressão interna (P/P_y), onde $P_y = (2 \cdot \sigma_y \cdot t / D_m)$ e D_m – diâmetro médio, produziu efeitos benéficos na capacidade de carregamento de flexão bem como na correspondente curvatura.

Em termos específicos de capacidade de carregamento, a pressão interna foi benéfica para cotovelos de paredes fina ($D/t=90$), enquanto para paredes mais grossas ($D/t=20$) a pressão interna está associada com pequena ovalização e resultou em uma significativa redução da capacidade máxima pois a pressão interna contribuiu para o escoamento.

A ovalização ($ov = |D_A - D_B| / (2D_m^2)$) da seção transversal sob carregamento de flexão no plano no fechamento do cotovelo resultou em um momento limite (M) menor do que o momento de plastificação da seção transversal ($M_p = \sigma_y \cdot t \cdot D_m^2$), conforme mostrado na Figura 10.

Conforme mostrado na Figura 11, a ovalização da seção transversal sob carregamento de flexão no plano fechando o cotovelo se dá sob a forma achatada da seção.

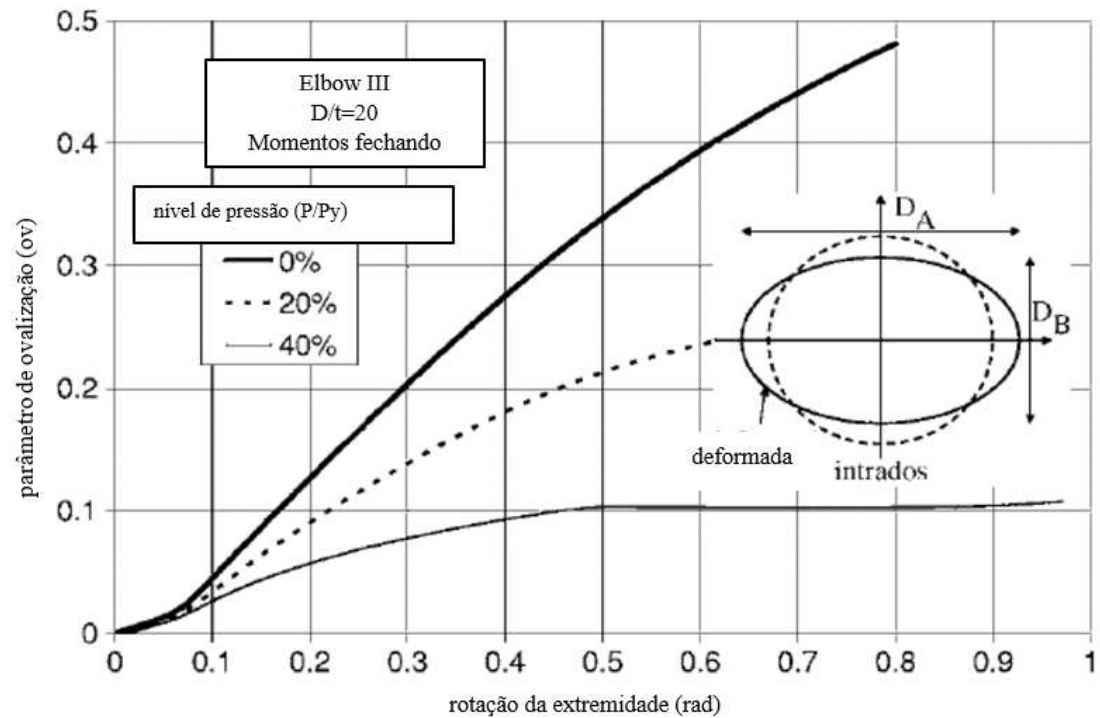


Figura 11 – Ovalização da parede do cotovelo de parede grossa $D/t=20$ sob carregamento de flexão no plano fechando o cotovelo para diferentes níveis de pressões internas [9]

2.4.2 Para carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo

Sob carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo com pressão interna, o estudo mostrou que a resposta do cotovelo é significativamente afetada. Os efeitos da pressão interna foram benéficos para o cotovelo de parede fina Elbow I ($D/t=90$) aumentando a capacidade de carregamento do cotovelo e reduzindo a ovalização, conforme mostrado na Figura 12.

Para cotovelos de parede mais fina Elbow II ($D/t=55$) e Elbow III ($D/t=20$) os efeitos da pressão interna podem não ser tão benéficos. Em particular, a presença de pressão interna causou uma considerável redução na capacidade de carregamento do Elbow III ($D/t=20$), conforme mostrado na Figura 13(a). Verificou-se que cotovelos de parede grossa sob carregamento de flexão no plano abrindo-o e pressão interna houve uma pequena ovalização. A resposta do cotovelo foi governada pelo escoamento longitudinal e, em função disto, o cotovelo comportou-se como um segmento de tubo reto.

Sob carregamento de flexão no plano abrindo, o cotovelo apresentou ovalização “negativa”, tal que o comprimento do diâmetro no plano da flexão aumentou. Como consequência, a capacidade de carregamento abertura foi significativamente maior do que a capacidade correspondente no fechamento

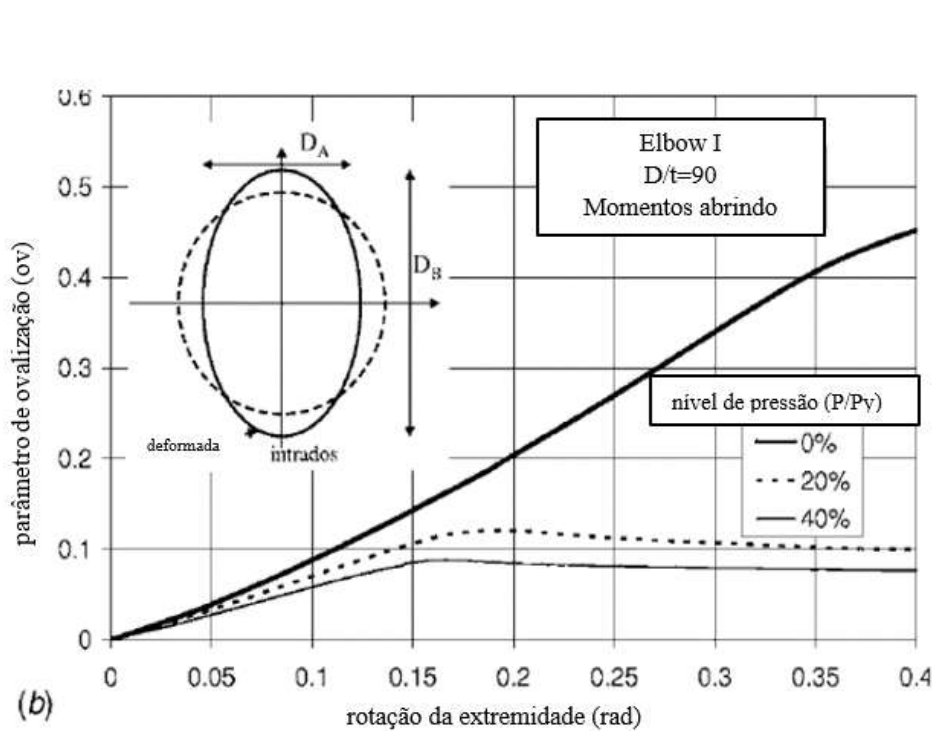
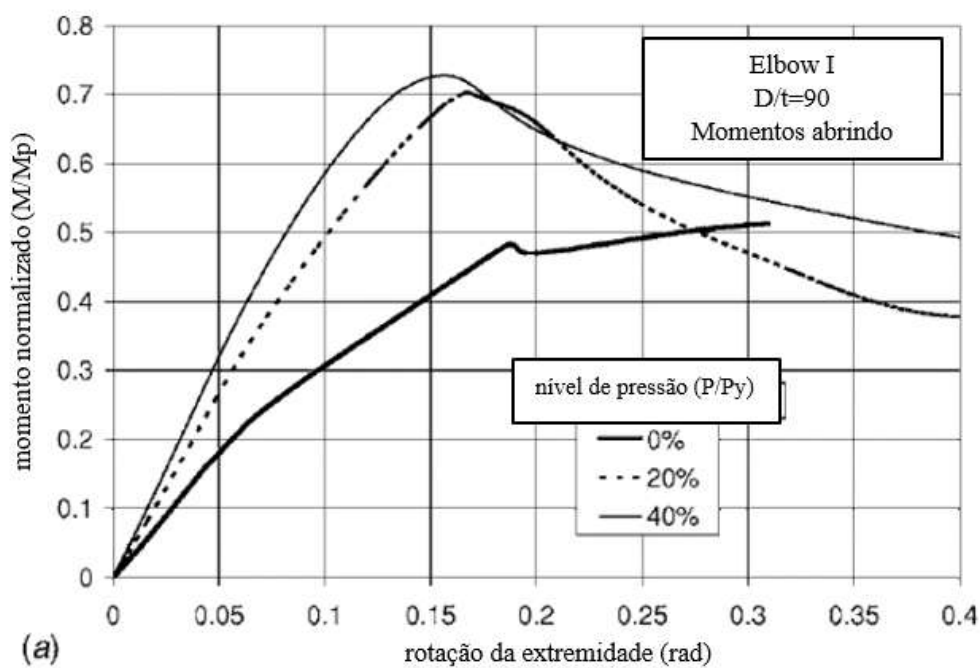


Figura 12 – Resposta do Elbow I ($D/t=90$) sob carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo e três níveis de pressão interna: (a) diagrama de momento-rotação e (b) diagrama de ovalização-rotação [9]

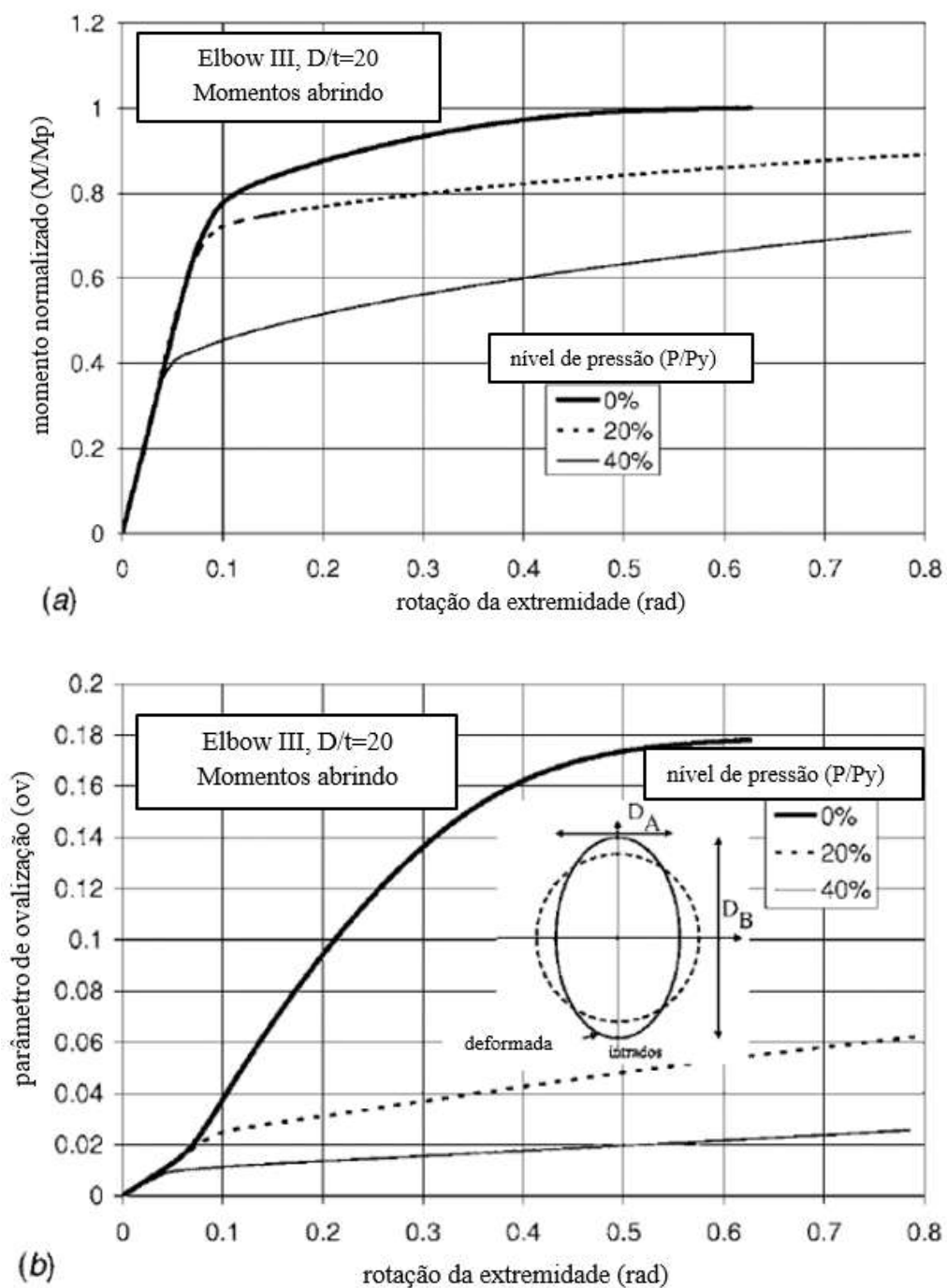


Figura 13 – Resposta do Elbow III ($D/t = 20$) sob carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo e três níveis de pressão interna: (a) diagrama de momento-rotação e (b) diagrama de ovalização-rotação [9]

A perda da estabilidade do cotovelo de parede fina ($D/t=90$) sob carregamento de flexão no plano sem pressão interna apresentou-se no flanco da seção transversal, enquanto que de parede grossa ($D/t=55$) falhou devido à perda da estabilidade na parte adjacente reta do tubo, conforme mostrado na Figura 14.

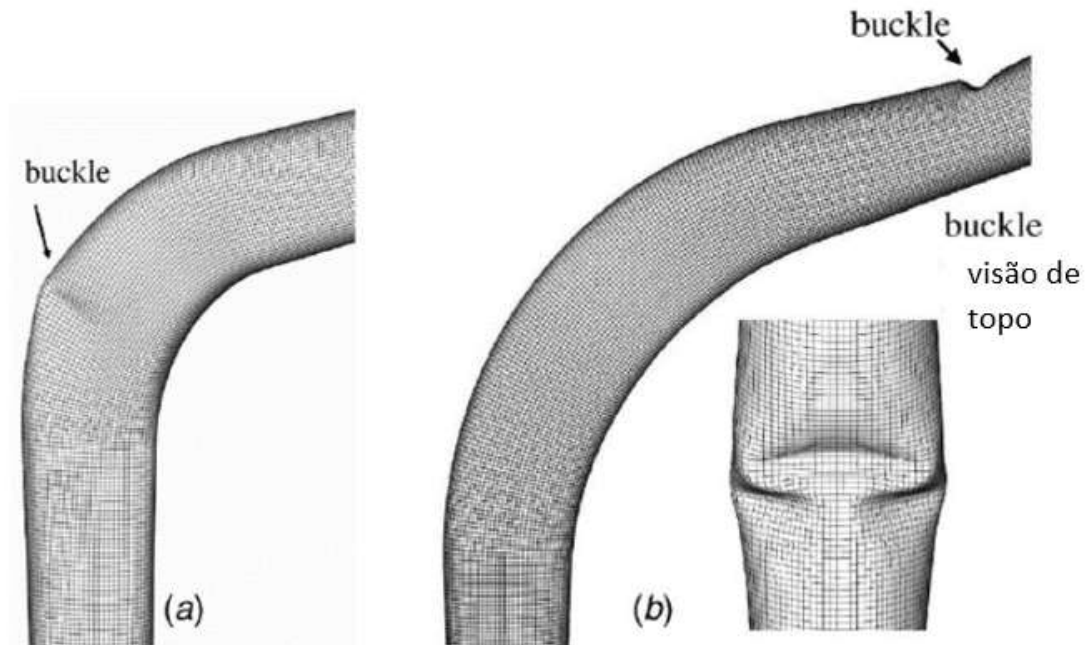


Figura 14 – Perda da estabilidade (Buckles) nos cotovelos sob carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo sem pressão interna: (a) Elbow I ($D/t=90$) e (b) Elbow II ($D/t=55$) [9]

A perda da estabilidade dos cotovelos de parede fina ($D/t=90$) e parede grossa ($D/t=55$) sob carregamento de flexão no plano com pressão interna (20% da pressão de escoamento) apresentou-se na parte adjacente reta do tubo, conforme mostrado na Figura 15.

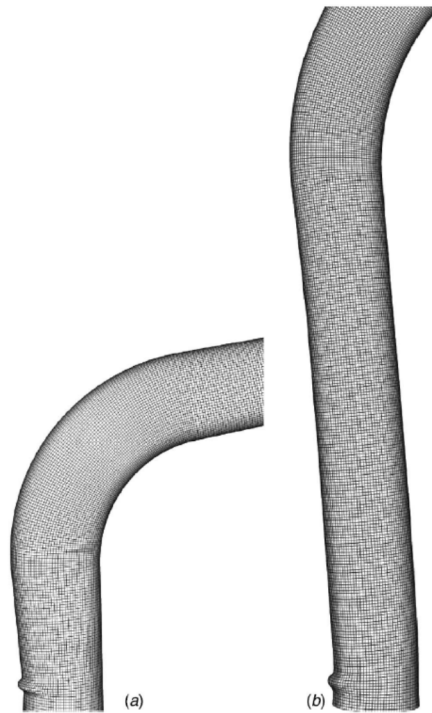


Figura 15 – Perda da estabilidade (Buckles) nos cotovelos sob carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo com pressão interna: (a) Elbow I ($D/t = 90$) e (b) Elbow II ($D/t = 55$) [9]

A ocorrência da perda da estabilidade nos cotovelos conforme mostrado na Figura 15 está associada com um comportamento pós-perda de estabilidade altamente instável, conforme mostrado, por exemplo, na Figura 12(a).

2.4.3 Para carregamento de flexão fora do plano

A resposta do cotovelo sob carregamento de flexão fora do plano caracterizou-se pela ovalização da seção transversal do cotovelo na direção de 45° em relação ao eixo do tubo.

A forma da perda da estabilidade do cotovelo de parede fina Elbow I sob carregamento de flexão fora do plano é mostrada na Figura 16 para três níveis de pressão interna.

Observa-se que na ausência de pressão a perda da estabilidade é formada no extrados do cotovelo, tendo uma inclinação em relação ao eixo do cotovelo. Pode-se observar que sob carregamento de flexão fora do plano o cotovelo está sujeito a uma combinação de carregamento de flexão e torção. A presença da torção foi responsável pela direção da perda da estabilidade conforme mostrado na Figura 17, enquanto que a flexão produziu tensões compressivas no flanco do cotovelo, as quais foram responsáveis pelo fato dessa área apresentar com nível de tensão alto no cotovelo.

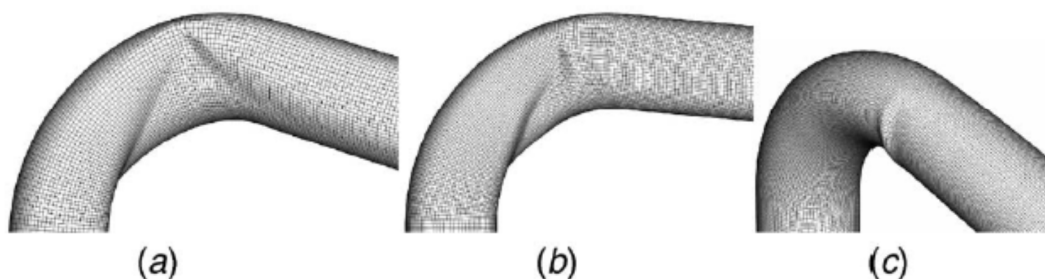


Figura 16 – Forma da perda da estabilidade do cotovelo de parede fina Elbow I ($D/t=90$) sob carregamento de flexão fora do plano: (a) para zero de pressão interna, e (b) para nível de pressão de 20% da P_y e (c) para nível de pressão de 40% da P_y [9]

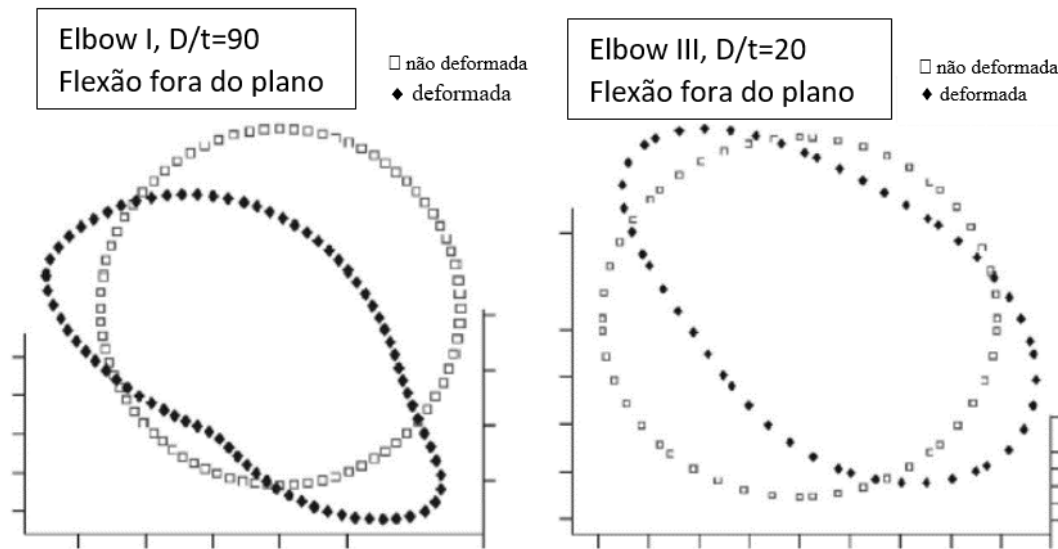


Figura 17 – Seção (F) transversal do cotovelo sob carregamento de flexão fora do plano: (a) Elbow I ($D/t=90$) e (b) Elbow II ($D/t=20$) [9]

O estudo comparou o estado de tensão provocado pelo carregamento de flexão no plano com o fora do plano, e observou que sob carregamento de flexão fora do plano a capacidade de carregamento é maior do que a flexão no plano fechando o cotovelo, mas significativamente menor do que o correspondente abrindo o cotovelo.

Conforme mostrado na Figura 19 e comparando com a Figura 18, a presença da pressão interna reduziu a ovalização da seção do cotovelo e aumentou a capacidade de carregamento de flexão fora do plano.

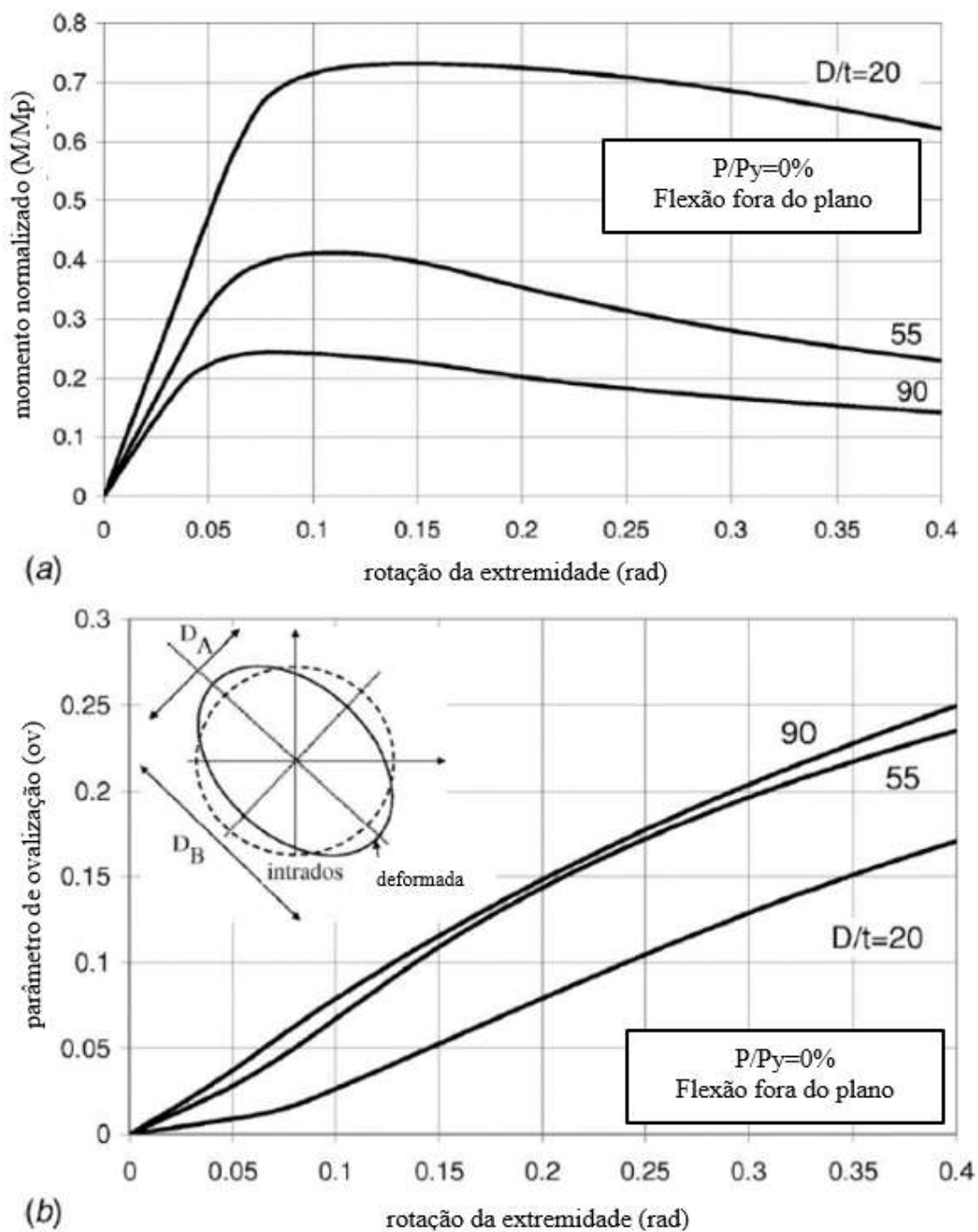


Figura 18 – Resposta dos cotovelos, Elbow I, II e III sob carregamento de flexão fora do plano: (a) diagrama de momento-rotação e (b) diagrama de ovalização-rotação [9]

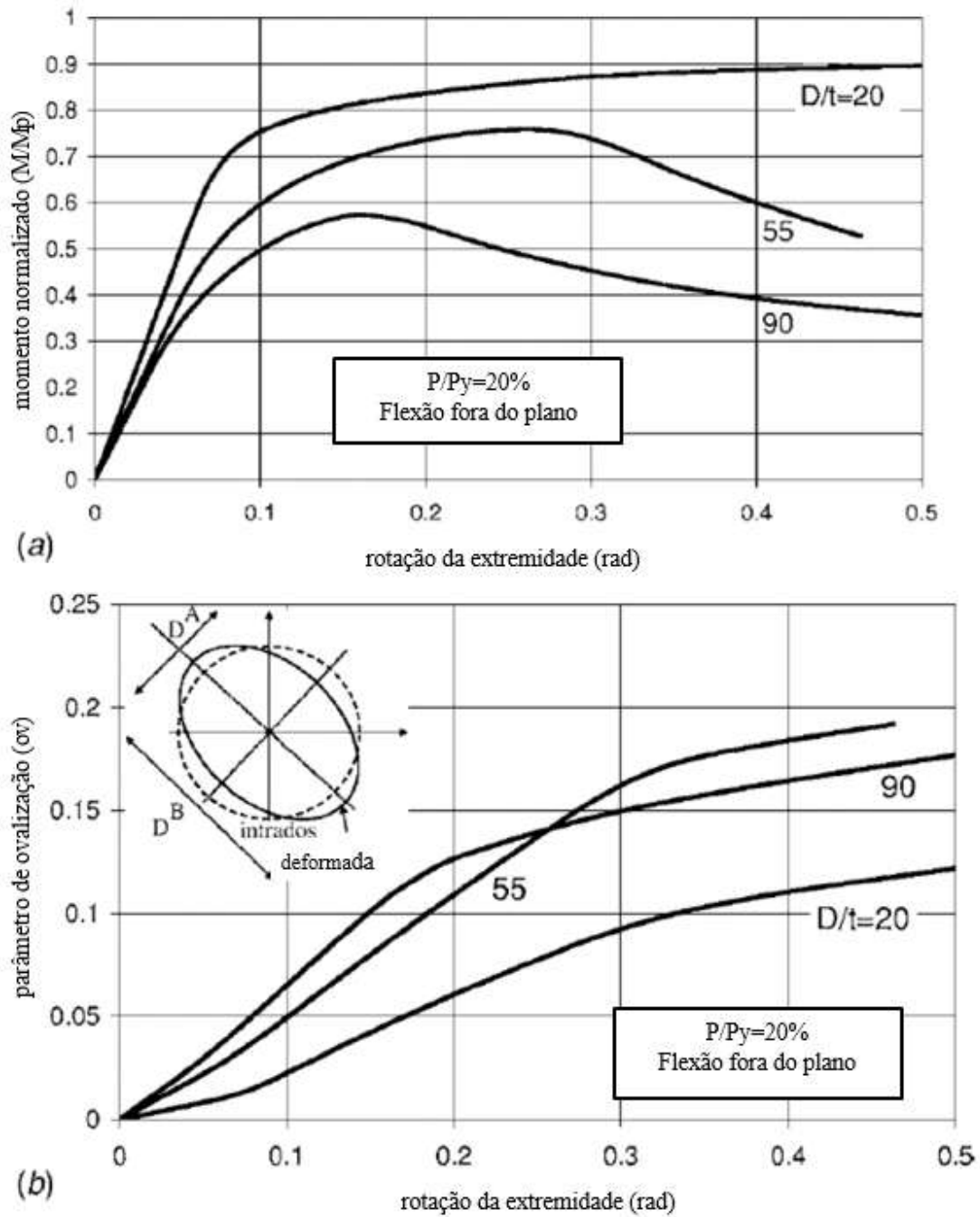


Figura 19 – Resposta dos cotovelos, Elbow I, II e III sob carregamento de flexão fora do plano para pressão interna de 20% da P_y : (a) diagrama de momento-rotação e (b) diagrama de ovalização-rotação [9]

2.5 Efeito do comprimento de tubo reto conectado nas extremidades do cotovelo a 90° sob carregamento de flexão no plano

Kim e Oh [10] estudaram o efeito do comprimento de tubo reto conectado nas extremidades do cotovelo de 90° sob carregamento de flexão no plano por intermédio de análise numérica pelo método dos elementos finitos usando modelo de material elasto-perfeitamente plástico aplicando com teoria de pequeno deslocamento, para diversas geometrias de cotovelo a 90° (variando L , R , r e t).

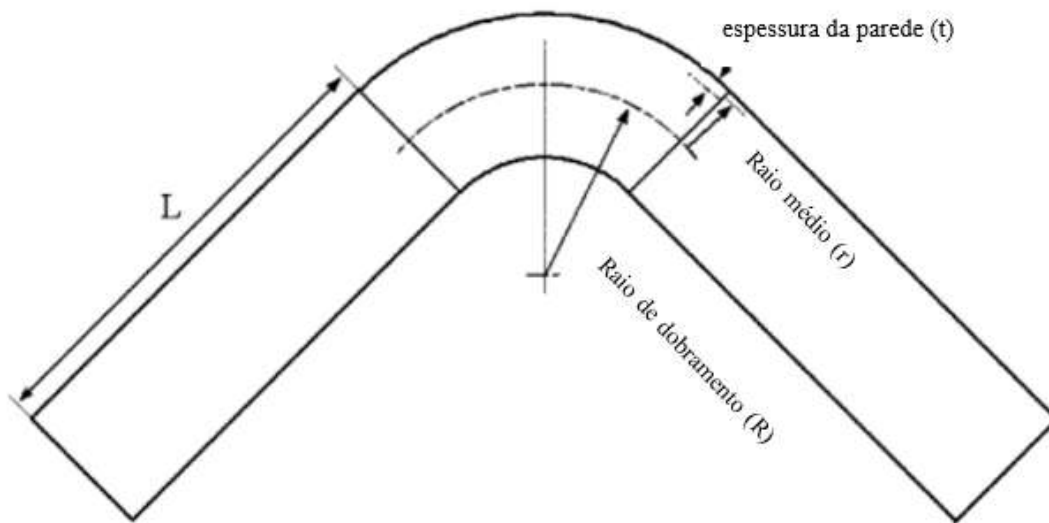


Figura 20 – Esquema do cotovelo com tubo reto conectado nas extremidades [10]

O estudo concluiu que o efeito do trecho reto pode ser significativo no carregamento plástico limite. Para o caso de carregamento de flexão no plano o carregamento limite não depende do comprimento reto quando a relação entre o comprimento reto e o raio médio da seção transversal for superior a 4. Quando a relação for menor do que 4, então o carregamento limite diminui gradativamente com o decréscimo do comprimento reto. No caso de não haver tubo reto conectado nas extremidades, o resultado obtido ficou próximo da solução proposta por Calladine [11], conforme mostrado na Figura 21.

O estudo também mostrou que o efeito do comprimento reto de tubo, conectado nas extremidades, no carregamento limite se dá devido ao perfil de escoamento resultante e a deformação plástica poder se espalhar pelo trecho reto também, o que aumenta o limite da capacidade de carregamento de flexão no plano.

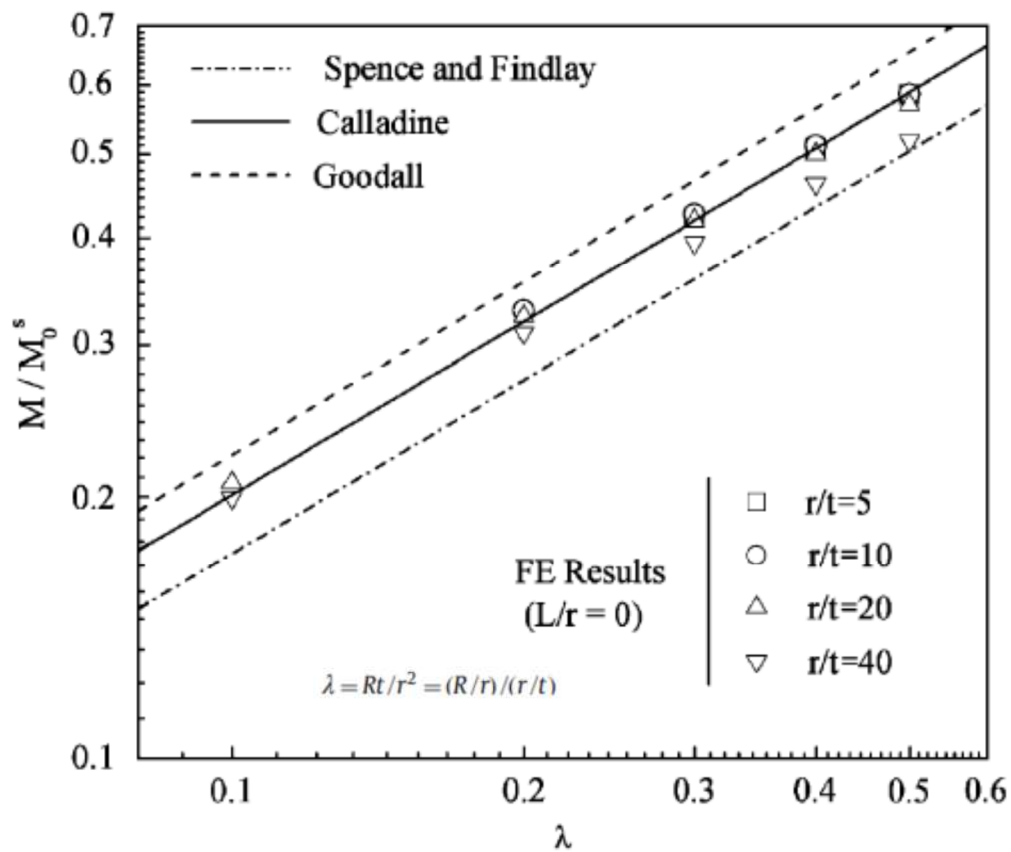


Figura 21 – Comparação das soluções limites por elementos finitos para carregamento de flexão no plano com soluções existentes (sem tubo reto conectado) – ($M_0^s = 4r^2 t \sigma_0$ – sendo σ_0 tensão de escoamento) [10]

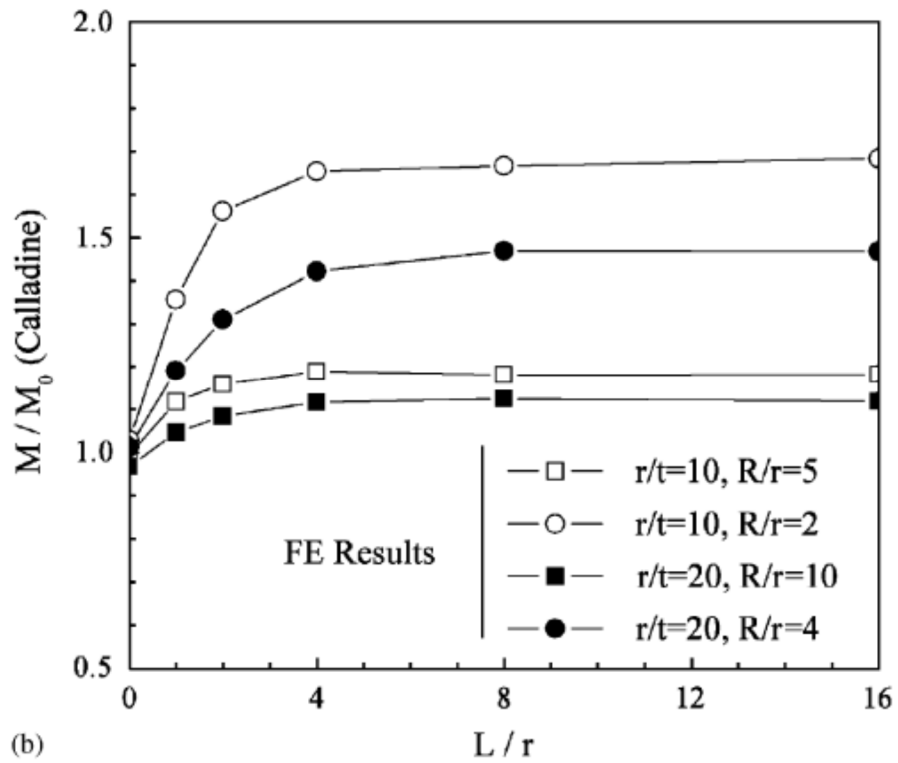
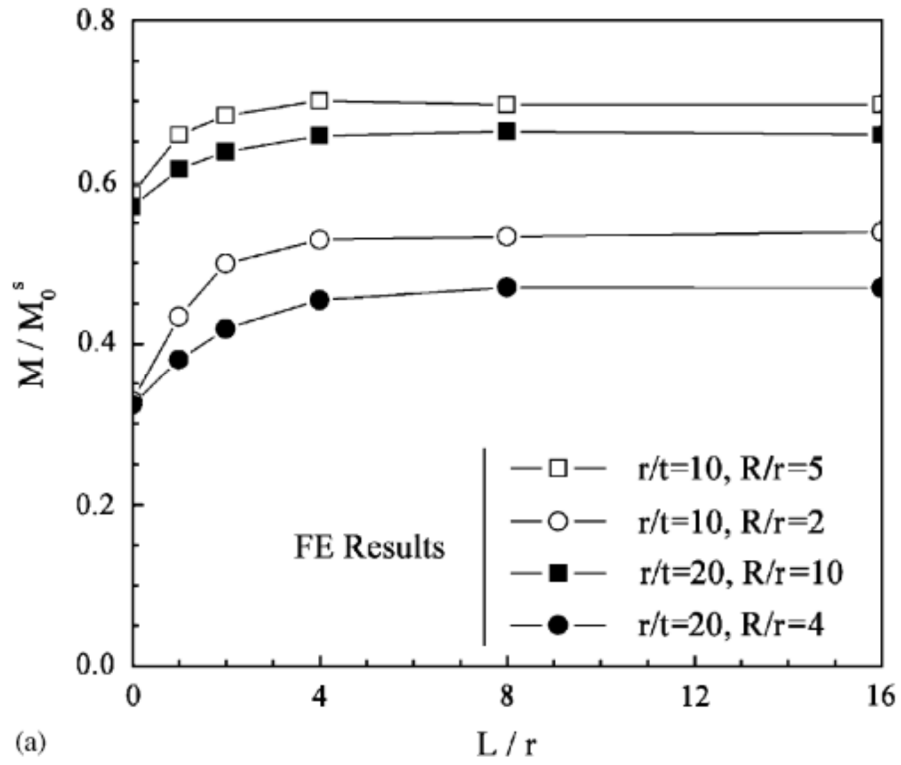


Figura 22 – Efeitos do comprimento de tubo reto conectado nas extremidades do cotovelo no carregamento limite de flexão no plano. O momento é normalizado com relação a: (a) $M_0^s = 4r^2 t \sigma_0$ e (b) com a solução de Calladine [11] - $M_0 = 4r^2 t \sigma_0 (0.935 \lambda^{2/3})$ – sendo σ_0 tensão de escoamento [10]

2.6 Carregamento plástico limite para cotovelo sob carregamento combinado de flexão no plano e torção

Li *et al.* [12] utilizaram análise numérica com modelo em 3D por elementos finitos para determinar soluções de carregamentos limites plásticos de cotovelos a 90° sob carregamento combinado de flexão e torção para os casos apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros geométricos dos cotovelos analisados [12]

$r = 100 \text{ mm}$	$L = 1000 \text{ mm}$	
Momento fletor puro no plano		
$r/t=5$	$R/r=2, 4, 6$	$\lambda=0.4, 0.8, 1.2$
$r/t=10$	$R/r=2, 4, 6$	$\lambda=0.2, 0.4, 0.6$
$r/t=20$	$R/r=2, 4, 6$	$\lambda=0.1, 0.2, 0.3$
$r/t=50$	$R/r=2, 4, 6$	$\lambda=0.04, 0.08, 0.12$
Momento torçor puro		
$r/t=5$	$R/r=2,3,4,5, 6$	$\lambda=0.4,0.6,0.8,1,1.2$
$r/t=10$	$R/r=2,3,4,5, 6$	$\lambda=0.2,0.3,0.4,0.5,0.6$
$r/t=20$	$R/r=2,3,4,5, 6$	$\lambda=0.1,0.15,0.2,0.25,0.3$
$r/t=50$	$R/r=2,3,4,5, 6$	$\lambda=0.04,0.06,0.08,0.1,0.12$
Momentos fletor no plano e torçor combinados		
$r/t=5$	$R/r=2, 6$	$\lambda=0.4, 1.2$
$r/t=20$	$R/r=2, 6$	$\lambda=0.1, 0.3$

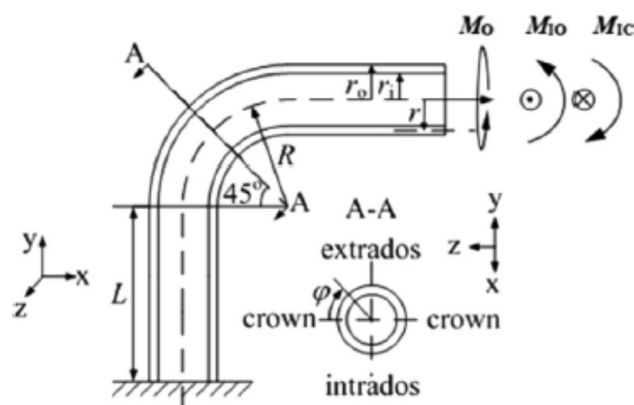


Figura 23 - Ilustração esquemática do cotovelo a 90° [12]

2.6.1 Algumas soluções relevantes de carregamentos limites

2.6.1.1 Carregamento de flexão pura no plano

Kim e Oh [13] propuseram, por intermédio de análise por elementos finitos com modelo 3D, a solução abaixo para carregamento limite de flexão pura no plano, a qual já considera os efeitos de tubo reto conectado nas extremidades do cotovelo.

$$\frac{M_I}{M_{str}} = A(\lambda + K)^n \quad (1)$$

$$A=0.6453(r/t)^{0.0772}; K=1.5398(r/t)^{-0.6755}; 0.1 \leq \lambda \leq 0.5$$

$$n=0.5157(r/t)^{0.00601}$$

onde,

M_I – momento de flexão no plano

σ_s – tensão de escoamento

t – espessura de parede

$$M_{str} = 4r^2t\sigma_s$$

2.6.1.2 Carregamento de torção pura

Guo [14] propôs a seguinte solução de carregamento de torção pura limite baseada no critério de Von Mises:

$$\frac{M_O}{M_{str}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \quad (2)$$

Onde, M_O é o carregamento plástico para cotovelo sob carregamento de torção pura e $M_{str} = 4r^2t\sigma_s$.

2.6.2 Resultados obtidos

2.6.2.1 Para o caso de carregamento de flexão pura no plano

A Figura 24 (a) mostra a comparação entre os resultados da análise por elementos finitos e os resultados propostos por Kim e Oh [13] na equação (1).

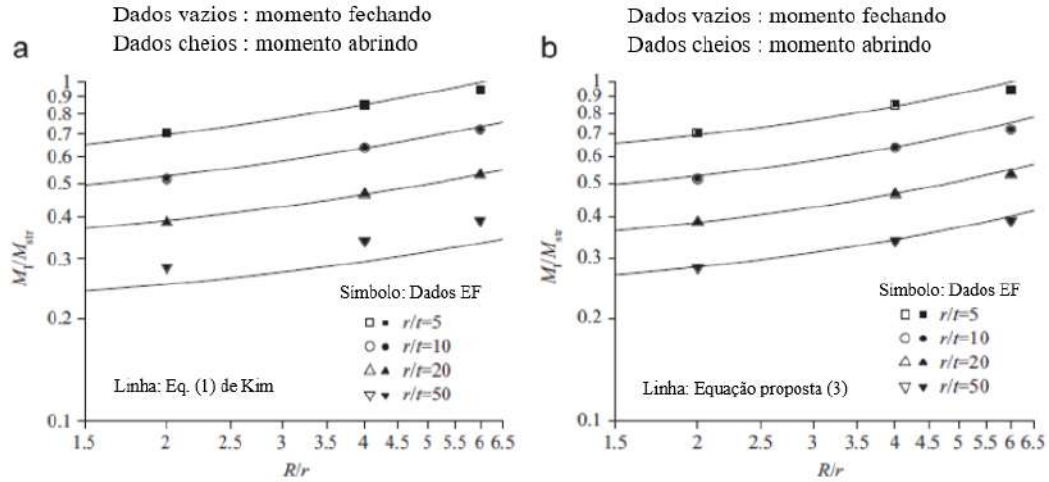


Figura 24 – Comparação entre as soluções obtidas por elementos finitos para carregamento de flexão pura no plano: (a) com a equação (1) e (b) com a equação (3) [12]

Na Figura 24 (a) pode-se observar que a equação (1) pode prever bem os resultados obtidos por elementos finitos para relação $r/t \leq 20$, enquanto que para $r/t=50$ a equação subestima os valores obtidos por elementos finitos neste estudo. Isto ocorre porque a equação (1) é aplicável para faixa $0.1 \leq \lambda \leq 0.5$, enquanto os resultados das análises por elementos finitos são para a faixa de $0.04 \leq \lambda \leq 1.2$. Assim sendo, foi proposta uma nova fórmula neste estudo, conforme abaixo.

$$\frac{M_I}{M_{str}} = \frac{1}{A_1 e^{B_1}} + \frac{1}{C_1 e^{D_1 R/r}} \quad (3)$$

$$A_1 = 1.1091 + \frac{0.1657r}{t}; B_1 = -0.0234 + \frac{0.0155r}{t}$$

$$C_1 = 0.7886 + \frac{0.1047r}{t}; D_1 = -2.3805 + \frac{0.0129r}{t}$$

$$0.04 \leq \lambda \leq 1.2$$

Na Figura 24 (b) pode ser observado que esta nova fórmula proposta prever bem os resultados obtidos nas análises por elementos finitos.

2.6.2.2 Para o caso de carregamento torção pura

A Figura 25 mostra os resultados obtidos pelas análises por elementos finitos para carregamento de torção pura, onde no gráfico (a) é mostrada a comparação com a equação (2) de Guo [14], no (b) é mostrada a comparação com a equação (4) usando a variável λ e no (c) a comparação com a equação (5) a qual usa duas variáveis R/r e r/t . As equações (4) e (5) foram desenvolvidas dos resultados das análises por elementos finitos para carregamento de torção pura no presente estudo, conforme abaixo:

$$\frac{M_O}{M_{Str}} = 0.08678\lambda^{0.2862} \quad (4)$$

$$\frac{M_O}{M_{Str}} = 1.0682\left(\frac{r}{t}\right)^{-0.3114}\left(\frac{r}{t}\right)^{0.1787} \quad (5)$$

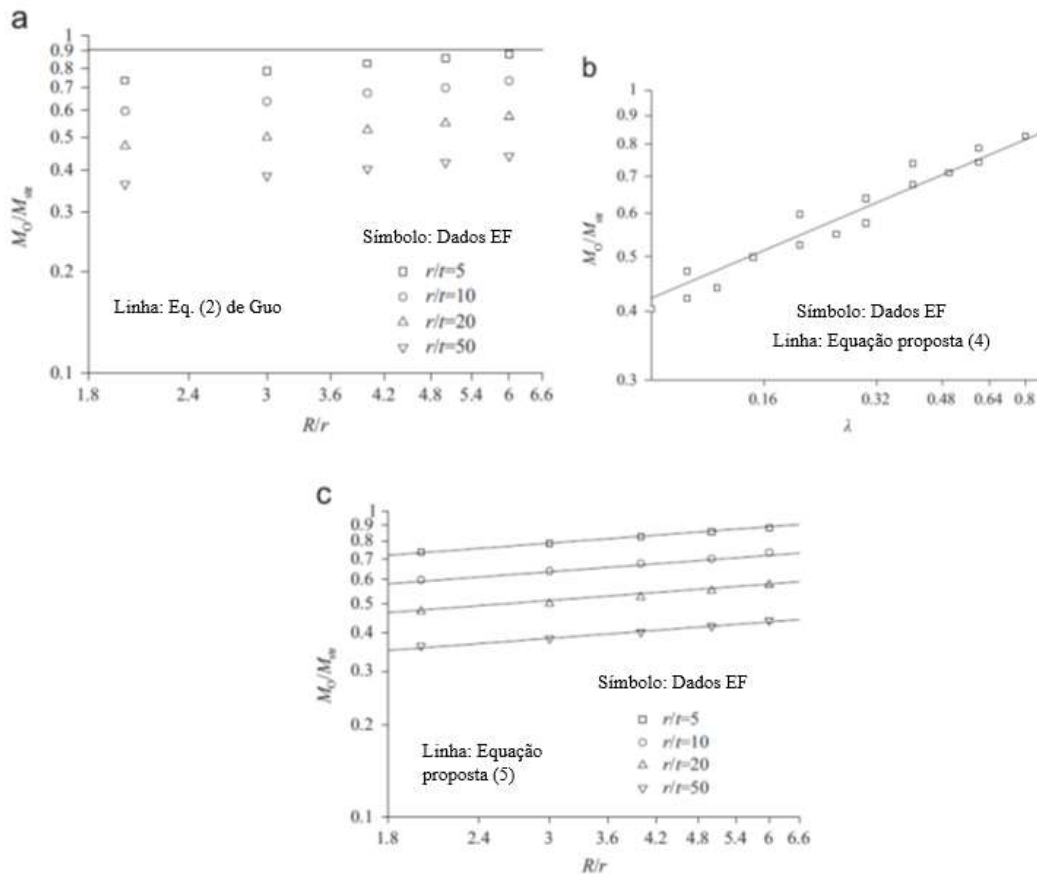


Figura 25 - Comparação dos resultados das análises por elementos finitos para carregamento de torção pura com algumas equações propostas: (a) com a equação (2), (b) com a equação (4) e (c) com a equação (5) [12]

O estudo concluiu que a equação (2) de Guo [14] superestimou as análises por elementos finitos em muitos casos. As diferenças entre a equação (2) e as análises por elementos finitos aumentam com o aumento da relação r/t e diminuem com o aumento da relação R/r . Concluiu-se então que a equação (2) de Guo [14] não se ajustou bem, principalmente, para cotovelos de parede fina e pequenos raios de curvatura e que a equação (5) com duas variáveis R/r e r/t pode prever melhor os resultados por elementos finitos que a equação (4) com um variável só, λ . Logo, r/t foi o principal fator que afetou as soluções de carregamento limite, assim como concluído também para carregamento de flexão pura no plano.

Também foi concluído pelo estudo que aplicando um carregamento torção pura em uma extremidade livre com a outra engastada houve uma combinação de flexão com torção no cotovelo, conforme esquema apresentado na Figura 26. Os efeitos combinados se espalharam também pelo comprimento reto do tubo.

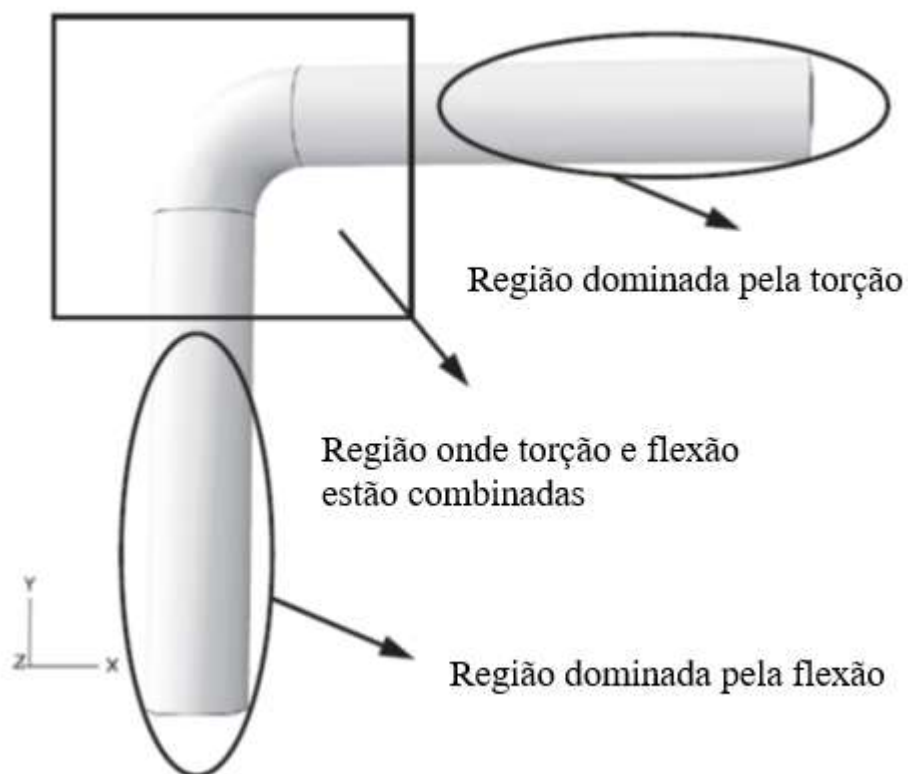


Figura 26 – Padrão de forças atuantes para cotovelo sob carregamento de torção pura com tubo reto conectado nas extremidades [12]

2.6.2.3 Para o caso de carregamento combinado de flexão no plano e torção

A Figura 27 mostra a ovalização sofrida pela seção transversal do cotovelo para carregamento combinado de flexão no plano (fechamento (a) e abertura (b)) e torção bem como a forma da deformação e a direção.

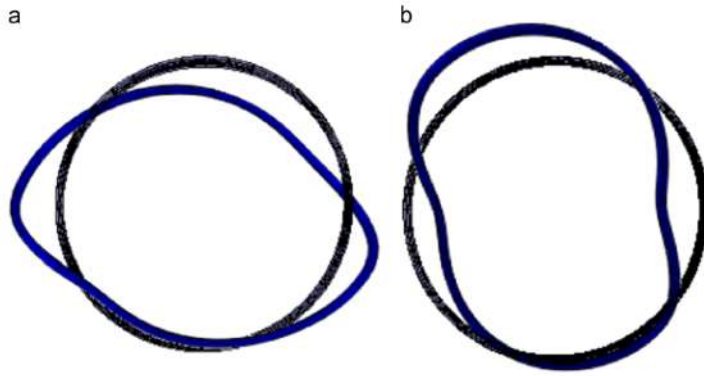


Figura 27 – Deformações e suas formas da seção transversal do cotovelo (seção A-A) para carregamentos combinados de flexão no plano e torsão: (a) carregamento de flexão no plano fechando o cotovelo com torção e (b) carregamento de flexão no plano abrindo o cotovelo com torção [12]

O estudo mostrou que para o caso de carregamento combinado de flexão no plano e torção uma boa aproximação pode ser obtida por uma referência circular, conforme a equação (6) e mostrado nas Figuras 28 e 29 abaixo.

$$\frac{M_{LI}}{M_I} + \frac{M_{LO}}{M_O} = 1 \quad (6)$$

Onde M_{LI} é o carregamento plástico limite para carregamento de flexão no plano combinado com carregamento de torção, M_{LO} é o carregamento plástico limite de torção combinado com carregamento de flexão no plano, M_I é da equação (3) e M_O é da equação (5).

Para carregamento combinado as sequências de carregamento proporcional foram consideradas no estudo das seguintes formas: M_B - M_T e M_T - M_B . No caso de M_B - M_T , o carregamento de flexão no plano (M_B) foi aplicado no primeiro passo, mantido constante e então aplicado o carregamento de torção o segundo passo. Enquanto que para o caso M_T - M_B , o carregamento de torção (M_T) foi aplicado no primeiro passo, mantido constante e o carregamento de flexão pura no plano aplicado no segundo passo.

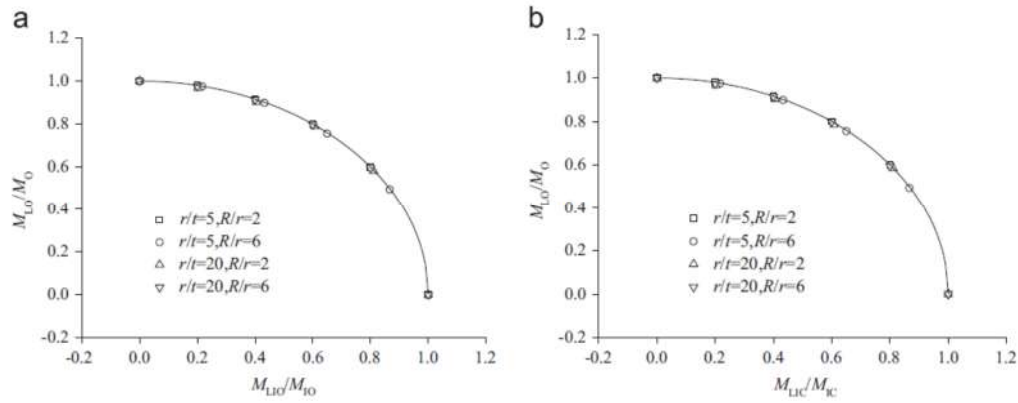


Figura 28 – Curva de interação entre os carregamentos de flexão e torção para o caso MB-MT: (a) carregamento combinado de torção e flexão no plano fechando o cotovelo e (b) carregamento combinado de torção e flexão no plano abrindo o cotovelo [12]

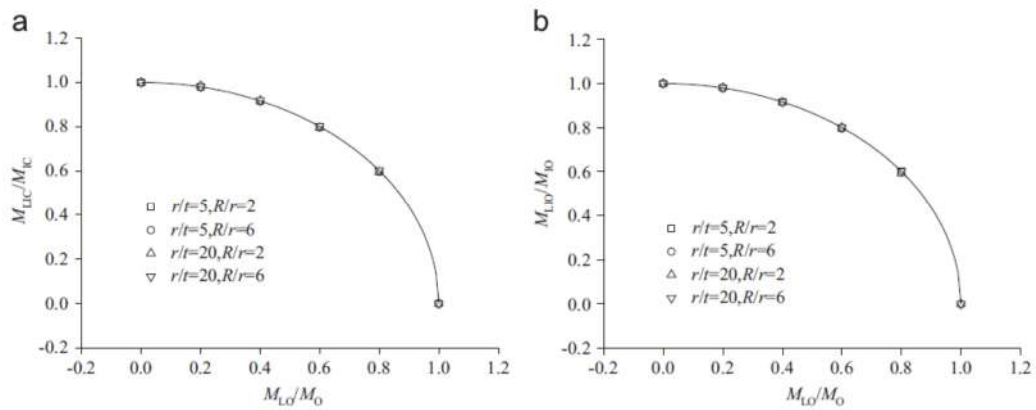


Figura 29 – Curva de interação entre os carregamentos de flexão e torção para o caso MT-MB: (a) carregamento combinado de torção e flexão no plano fechando o cotovelo e (b) carregamento combinado de torção e flexão no plano abrindo o cotovelo [12]

2.7 Perda da estabilidade no regime plástico de tubos sob carregamento de flexão e pressão interna

Segundo Kim [15] perda de estabilidade local (local buckling) de tubos submetidos apenas a flexão tem sido investigado por muitos pesquisadores. As investigações mostraram que a perda da estabilidade de tubo é possível ocorrer em dois modos diferentes: ponto limite e instabilidade de bifurcação. Como a deformação aumenta com o aumento do momento, isto causa uma redução na capacidade de resistir a carregamento de flexão da seção transversal até que um ponto limite seja alcançado onde a curva de curvatura devido ao carregamento terá inclinação zero. A perda de estabilidade do tubo além desse ponto é chamada de instabilidade de ponto limite. A instabilidade de ponto limite pode ocorrer tanto no regime elástico com no plástico.

Imperfeições podem causar deformações axiais locais em forma de ondas “wrinkles” na região comprimida do duto curvado antes que o ponto limite seja atingido. Esse tipo de instabilidade associada com a deformação axial é chamado de instabilidade de bifurcação.

De fato, esses dois diferentes modos de deformação ocorrerão simultaneamente um ou outro predominando na falha. Os fatores que determinam a predominância são: (a) imperfeições iniciais; (b) relação diâmetro-espessura de parede; (c) condições de extremidade do duto e comprimento e (d) pressão interna.

Investigações anteriores mostraram que instabilidade de bifurcação tende a preceder a de ponto limite para grandes relações diâmetro-espessura de parede. Ao contrário acontece para relações menores de diâmetro-espessura de parede. A faixa de transição parece estar na faixa de relação entre 35 e 45. As investigações também mostraram que a instabilidade de bifurcação ocorre no regime plástico para relações entre a faixa de transição e 120.

A análise analítica do comportamento da instabilidade plástica de bifurcação de um tubo sob flexão apenas já é complexa e torna-se mais complicada se tensões circunferenciais são incluídas na análise.

Kim [15] analisou a instabilidade axissimétrica plástica de bifurcação de um duto sob compressão axial combinada com pressão interna e concluiu que:

- a) A análise axissimétrica de bifurcação é um método simples e aproximado de prever deformações de instabilidade de dutos submetidos a flexão e pressão interna;

- b) A pressão interna contribui para as magnitudes das deformações de instabilidade quando comparado com valores de flexão apenas;
- c) A análise simplificada não é capaz de investigar os possíveis efeitos dos ciclos de pressurização e despressurização no comportamento da perda da estabilidade.

2.8 Critérios para colapso plástico - Característica do Colapso Plástico de Estruturas de Tubos Curvados

Segundo Li e Mackenzie [16] a resposta de um tubo curvado sob carregamento de flexão e pressão interna é complicado pelo fato que as respostas de pressão e flexão são acopladas. Os efeitos de grades deformações e de acoplamento das respostas não são modelados por uma análise limite convencional que assume a teoria das pequenas deformações e podem apenas serem determinados por análise elasto-plástica com grandes deformações ou experimentalmente. Em adição, se um modelo de material com comportamento de encruamento sob deformação for considerado, a análise se torna mais ainda complicada.

O estudo de Li e Mackenzie [16] abordou critérios para determinação do colapso plástico, tais como: TES (ASME *Twice elastic slope criterion*) e TI (*Tangent intersection criterion*).

O estudo fora realizado pelo método dos elementos finitos e com as condições abaixo:

- Modelos elástico-perfeitamente plástico e encruamento bilinear para material;
- Módulo de Elasticidade: $E=200$ GPa;
- Tensão de Escoamento: $\sigma_y=300$ MPa e coeficiente de Poisson de 0,3;
- Módulo Plástico na análise limite $E_p=0$;
- Dois diferentes valores para as análises com encruamento bilinear: $E_p = 10$ GPa e 4 GPa.
- Tubo curvado a 90° com raio médio da seção transversal de 250 mm, relação raio de curvatura com raio médio de 3 mm e espessura de parede de 20 mm, logo o parâmetro de dobramento $h=0,24$. E seções retas de 10 vezes o raio médio nas extremidades do cotovelo.

2.8.1 Critério twice slatic slope (TES)

O carregamento plástico P_p (Figura 30(a)) é definido como aquele que corresponde a interseção da curva carregamento-deformação e a linha reta chamada de linha limite de colapso, oriunda da origem da curva de deformação num ângulo de $\phi = \tan^{-1}(2 \tan \theta)$, que é o dobro do gradiente ou inclinação da resposta elástica inicial em relação ao eixo y .

2.8.2 Critério tangent intersection (TI)

Este critério define o carregamento plástico P_p (Figura 30(b)) como o correspondente a interseção entre a linha reta tangente a curva de resposta elástica inicial e a região de deformação plástica da curva característica.

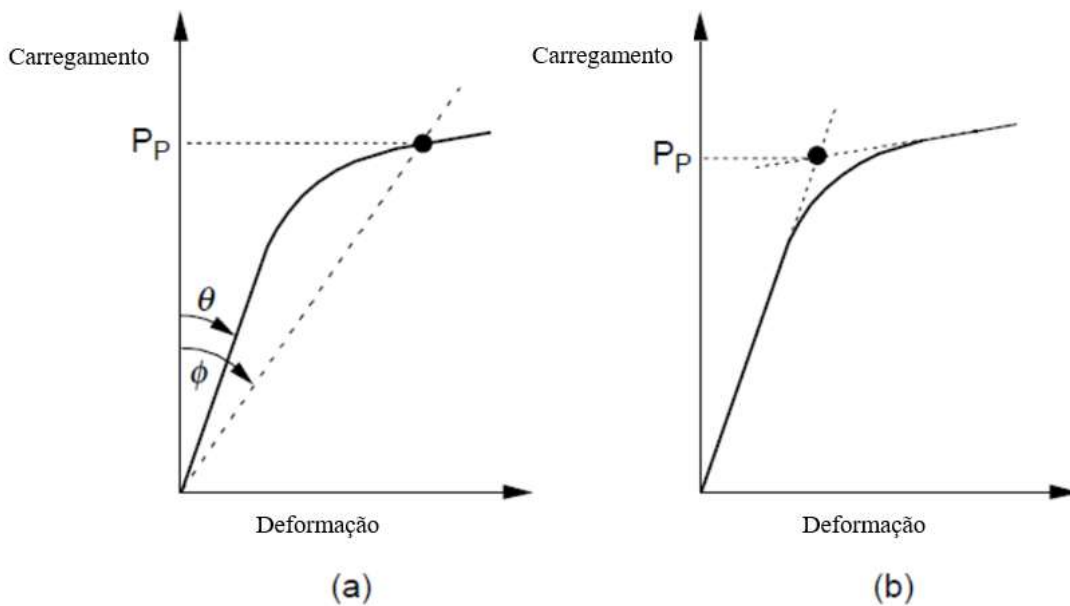


Figura 30- (a) Critério *twice elastic slope*, TES; (b) critério *tangent intersection*, TI [16]

Como a característica da curva é definida em termo de um parâmetro específico de deformação (deslocamento ou deformação) em um ponto da estrutura, os critérios TES e TI essencialmente caracterizam a resposta baseado em um indicador local do colapso plástico.

A escolha do parâmetro de deformação tem efeito significativo no carregamento plástico calculado.

2.8.3 Resultados do estudo

O comportamento do tubo curvado sob carregamento de flexão no plano no regime elástico foi o mesmo, tanto na abertura quanto no fechamento do tubo curvado. O primeiro escoamento ocorreu na região central parte interna do *crown* da curva para ambos os casos. Conforme o carregamento de flexão foi aumentando além do limite de escoamento, alcançando grande deformação, a distribuição da deformação plástica foi diferente para abertura e fechamento do tubo curvo.

A característica da curva momento-rotação é mostrada na Figura 31 para grande deslocamento sob carregamentos de flexão no plano abrindo e fechando o tubo curvado. No caso do fechamento, para material elasto-perfeitamente plástico e pela teoria de grande deslocamento, o carregamento que causou a perda da estabilidade ocorreu em torno de 80% do carregamento limite obtido pela teoria de pequeno deslocamento. Enquanto que na abertura, o carregamento na perda da estabilidade foi significativamente maior do que o carregamento limite.

Aplicando os critérios TES e TI nas curvas da Figura 31, para o caso de fechamento do tubo curvado e material elasto-perfeitamente plástico, o carregamento plástico (M_{TES}) não pode ser definido, pois não houve interseção entre a linha de limite de colapso e a curva momento-rotação, enquanto que o carregamento plástico usando o critério TI foi de $M_{TI}=600$ KNm. Utilizando o material bilinear, $M_{TES}=M_{TI}=700$ KNm, ou seja, por ambos os critérios se chegou ao mesmo valor de momento.

Já o critério TES pode ser aplicado para ambos modelos de materiais para o caso de abertura do tubo, obtendo os seguintes valores: $M_{TES}=900$ KNm para material elasto-perfeitamente plástico e $M_{TES}=980$ KNm para material bilinear.

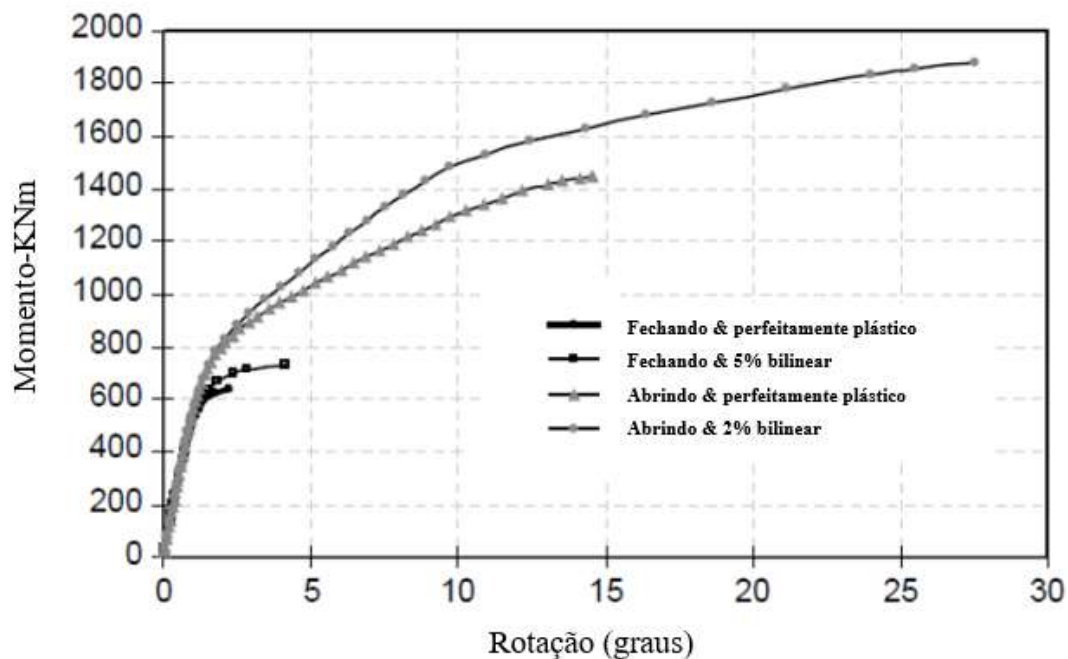


Figura 31- Característica da curva momento-rotação obtida na análise pela teoria de grande deslocamento [16]

Entretanto, deve-se ter o cuidado ao aplicar o critério TI para curvas de abertura. Pois observou-se que a curva perfeitamente plástica possuía uma região de resposta essencialmente regular, mas que a sua inclinação foi modificada justamente antes da falha por perda da estabilidade. Obtendo a tangente da primeira região de resposta regular obteve-se o valor de $M_{TI}=810$ kNm para abertura com modelo de material elasto-perfeitamente plástico. No modelo de material bilinear duas regiões regulares foram observadas. Examinando a distribuição das deformações plásticas observou-se que o primeiro ponto a escoar foi no *crown* do cotovelo na curva e a zona plástica se desenvolveu com o aumento do carregamento.

2.9 Perda de estabilidade de coluna sob compressão [17] [18]

Em muitas aplicações práticas, nas quais a estabilidade estrutural de colunas é um critério básico de projeto, as forças não permanecem fixas em uma direção, mas passam por um ponto fixo. Esse é um caso de problema de comportamento de força (durante o processo de perda da estabilidade estrutural) no qual o sistema pode ser considerado também como conservativo. Entretanto, problemas de força seguidoras não podem ser considerados nesta categoria.

Exemplo desse tipo de problema é mostrado na Figura 32 abaixo, cuja coluna de comprimento L é engastada em uma extremidade e na outra extremidade livre é aplicada a carga que passa por um ponto fixo distante da extremidade livre da coluna.

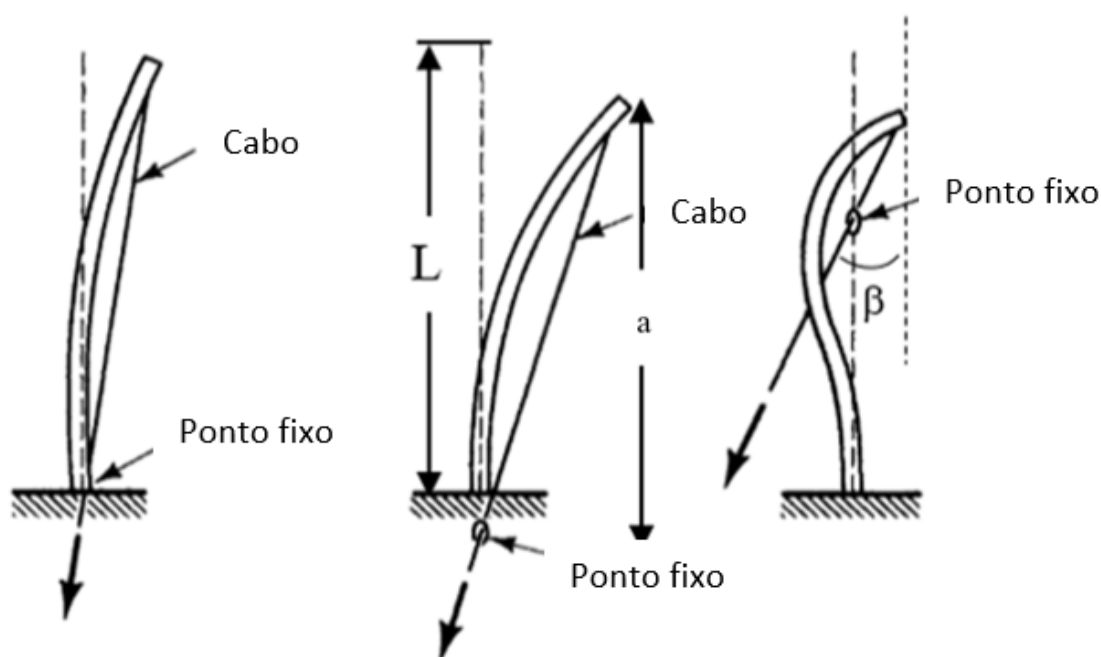


Figura 32 – Exemplo de caso no qual a força passa por um ponto fixo [17]

A solução deste problema conforme nota de aula de Netto [18] mostra que o carregamento crítico (C_c) é em função da relação entre o comprimento da coluna e a distância vertical do ponto fixo a extremidade livre da coluna, considerando que o ângulo que o cabo faz com um eixo vertical passando pelo ponto de fixação do cabo na extremidade livre da coluna é pequeno, ou seja, $\sin \beta \cong \beta$.

Sendo E o módulo de elasticidade do material e I o momento de inércia da seção da coluna, o carregamento crítico (Cc) em função do comprimento da coluna (L) e a distância do ponto fixo a extremidade livre da coluna (a), é definido da seguinte forma:

$$\text{a) } Cc = 2.05 \pi^2 \frac{EI}{L^2}, \text{ para } \frac{a}{L} = 0$$

$$\text{b) } 1 < \frac{Cc}{\frac{\pi^2 EI}{L^2}} < 2.05, \text{ para } 0 < \frac{a}{L} < 1$$

$$\text{c) } Cc = \frac{\pi^2 EI}{L^2}, \text{ para } \frac{a}{L} = 1$$

$$\text{d) } Cc = \frac{1}{4} \frac{\pi^2 EI}{L^2}, \text{ para } \frac{a}{L} \rightarrow \infty$$

$$\text{e) } \frac{1}{4} < \frac{Cc}{\frac{\pi^2 EI}{L^2}} < 1, \text{ para } 1 < \frac{a}{L} < \infty$$

3 Normas vigentes para verificação de integridade de conectores

O pescoço de ganso é um componente do Módulo de Conexão Vertical com formato de um tubo cilíndrico curvado, cujo raio de curvatura pode ser três ou cinco vezes o diâmetro externo do cilindro. Como o Pescoço de Ganso é o responsável pela conexão do duto flexível ao Módulo de Conexão Vertical, as cargas impostas pelo duto flexível durante a instalação do Módulo de Conexão Vertical, com o duto flexível conectado, são transferidas para o restante do MCV e para o equipamento submarino no qual o MCV seja conectado. Para evitar danos ao equipamento submarino, aos demais componentes do MCV, ao duto flexível e qualquer outro elemento estrutural, o Pescoço de Ganso deve ser o componente de menor resistência estrutural, porém deve resistir aos esforços sem que haja sua ruptura ou deformação excessiva que o faça perder a funcionalidade.

O Pescoço de Ganso, geralmente, é projetado para trabalhar no regime elástico dos materiais envolvidos na sua fabricação e de seus eventuais reforços e acessórios. Porém, às vezes torna-se necessário instalá-lo sob condições, ou seja, cargas impostas pelo duto flexível, as quais provocam deformações plásticas.

Com possibilidade de utilização de diversos códigos de projeto, não há uma metodologia padronizada bem como não se sabe com que grau de conservadorismo pode-se aceitar ou não determinada deformação permanente. Ficando a critério do analista estrutural definir esta aceitação.

Na revisão bibliográfica foram apresentados estudos disponíveis que tratam dos principais fenômenos que podem ocorrer em tubos curvados submetidos a carregamentos de flexão, tração, pressão interna e pressão externa, combinados ou não. Neste trabalho consideraremos os esforços combinados de momento fletor, força normal e força cortante, todos no plano, nas condições mais críticas, fechando e abrindo a estrutura.

As normas internacionais ISO 13628-4 [19] e API 17D [20] estabelecem requisitos de projeto e testes de Árvore de Natal Molhada utilizadas na indústria de óleo e gás e define que as tubulações podem ser projetadas de acordo com as normas ANSI/ASME B31.4 [21], ANSI/ASME B31.8 [22] ou ANSI/ASME B31.3 [23].

A norma ISO 13628-15 [24] que estabelece requisitos de projeto e teste para estruturas e manifolds submarinos, define que as tubulações podem ser projetadas conforme os requisitos de normas internacionais, tais como: ASME B31.4 [21], ASME B31.3 [23], DNV-OS-F101 [25], DNV-RP-F112 [26] e API 1111 [27].

De maneira geral, as normas ISO 13628-4 [19], API 17D [20] e ISO 13628-15 [24] estabelecem que os equipamentos submarinos devem ser capazes de resistir aos carregamentos sem deformação que os inviabilizem para o uso fora dos requisitos de desempenho requeridos por cada equipamento. Para partes tubulares, estes devem ser capazes de suportar os carregamentos sem colapsar.

A norma DNV-RP-D101 [28], que estabelece os requisitos (melhores práticas) para análise estrutural de sistemas de dutos de instalações submarinas, informa que não há um código de projeto específico que cubra completamente os requisitos de integridade, segurança e funcionalidade dos sistemas de tubulação e recomenda um número de normas e padrões dos quais podem ser obtidas as equações para cálculos relevantes de tensões nas tubulações.

Nos códigos de projeto ASME a geometria que mais se aproxima da geometria do pescoço de ganso é o tubo curvado a 90° (Cotovelo), ou seja, não existe um código de projeto que contemple requisitos específicos para análise estrutural (análise de tensões e deformações) para o caso da geometria do pescoço de ganso com os carregamentos nele impostos.

A norma DNV-OS-F101 [25] trata de sistemas de dutos submarinos e tem como objetivo assegurar que o desenvolvimento do conceito, projeto, construção, operação de abandono de sistemas de dutos sejam seguros e conduzidos respeitando a segurança de pessoas e proteção do meio ambiente.

A norma API 17R [29] de 2015, que estabelece requisitos para sistema de conexão, define que conectores podem ser projetados conforme os requisitos de normas internacionais, tais como: API 6A [30], API 6X [31], API 17D [20] e ASME VIII [32][33], ou por análises pelo método dos elementos finitos (análises elásticas ou elasto-plásticas).

A norma mais utilizada para critério de aceitação das deformações plásticas no pescoço de gancho é a ISO 13628-7 [3], a qual define três critérios, para carregamentos que provoquem deformações plásticas, para análises elasto-plásticas por elementos finitos:

- a) Critério global: é o carregamento que cause deformação principal máxima de 2%, sem causar perda da estabilidade estrutural;
- b) Critério de falha local: é o carregamento que cause deformação plástica equivalente de Von Mises superior ao critério da equação (7); e

$$\varepsilon_{eqv} \leq \min \left[0,1 ; 0,5 \times \left(1 - \frac{\sigma_o}{\sigma_u} \right) \right] \quad (7)$$

ε_{eqv} – deformação plástica equivalente

σ_o – tensão de escoamento material na temperatura do projeto

σ_u – tensão última do material na temperatura do projeto

- c) Funcionalidade: é o critério que limita o potencial de performance insatisfatória que deve ser satisfeito em qualquer ponto do componente quando submetido aos carregamentos, isto é, a sua funcionalidade deve ser mantida após a exposição aos carregamentos normais e extremos.

4 Modelo numérico de elementos finitos

A determinação dos carregamentos máximos, combinados ou não, que podem ser suportados pelo cilindro curvo espesso foi realizada por intermédio de análises numéricas utilizando o método dos elementos finitos através do software comercial ANSYS, versão 16.2 [4].

4.1 Modelo geométrico

Foi utilizado um modelo geométrico tridimensional do cilindro conforme Figura 33, considerando dimensões nominais, sem discontinuidades geométricas e sem qualquer imperfeição (ovalização etc). Os flanges não foram modelados, pois considerou-se que são rígidos o suficiente para transferir as cargas impostas pelo duto sem se deformarem.

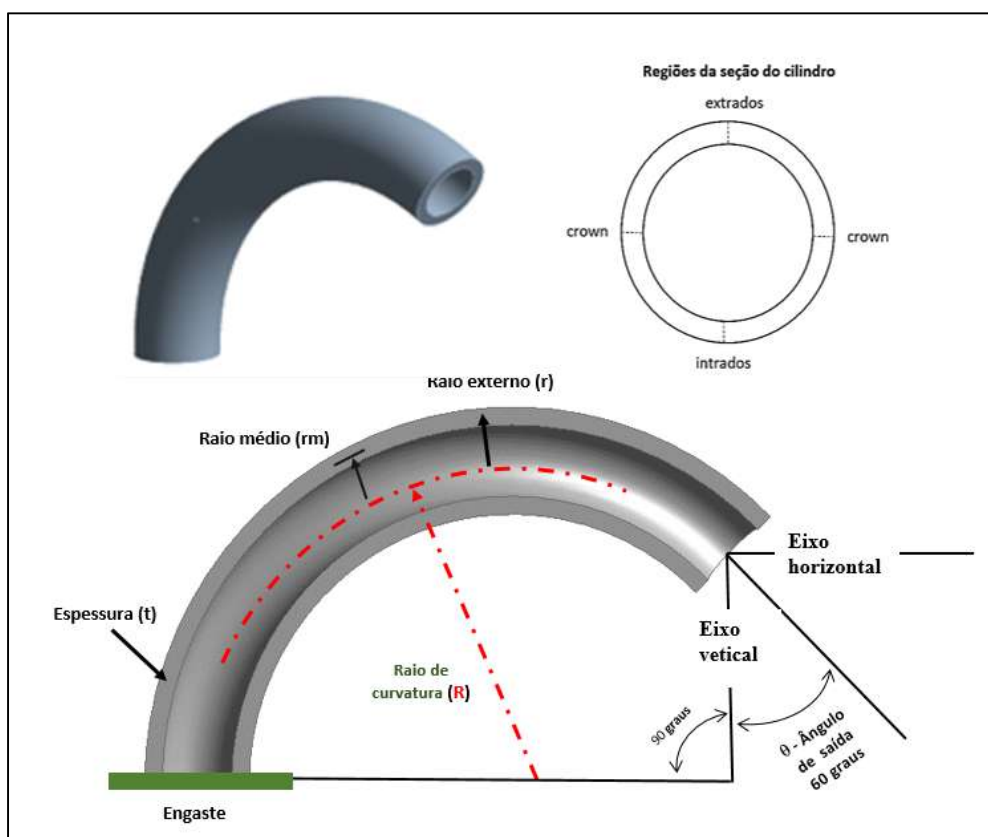


Figura 33 – Modelo geométrico tridimensional utilizado nas análises numéricas

4.2 Modelo de elementos finitos

Foi utilizado um modelo tridimensional e elemento sólido (SOLID185), com oito nós, interpolação linear, integração reduzida, com formulação aprimorada de deformação (“Enhanced strain deformation”), a qual durante a etapa de solução introduz certas quantidades de graus de liberdade internos (e inacessíveis) adicionais visando evitar a ocorrência de “shear locking” e “volume locking”. Os graus de liberdade internos são introduzidos automaticamente no nível do elemento e são condensados durante a fase de solução da análise.

Foi adotado um modelo com não-linearidade geométrica capaz de representar o comportamento não-linear da estrutura e que permitisse também representar os modos de falha objetos de interesse deste estudo.

Embora o modelo tridimensional permitisse o uso de simetria, foi utilizado o modelo sem simetria devido a problemas de convergência, os quais impossibilitaram determinar os carregamentos que causassem a perda da estabilidade estrutural com o modelo com simetria

4.3 Caracterização do material

O modelo de material utilizado, conforme Figura 34, foi assumido como aço, isotrópico, com limite de proporcionalidade de 60 Kpsi e tensão última de 85 Kpsi, módulo de elasticidade de 29.008 Kpsi e coeficiente de Poisson de 0.3, com comportamento bilinear até a tensão última. Na tensão última a deformação plástica é de 12% e após este valor o material foi considerado com comportamento elástico-perfeitamente plástico.

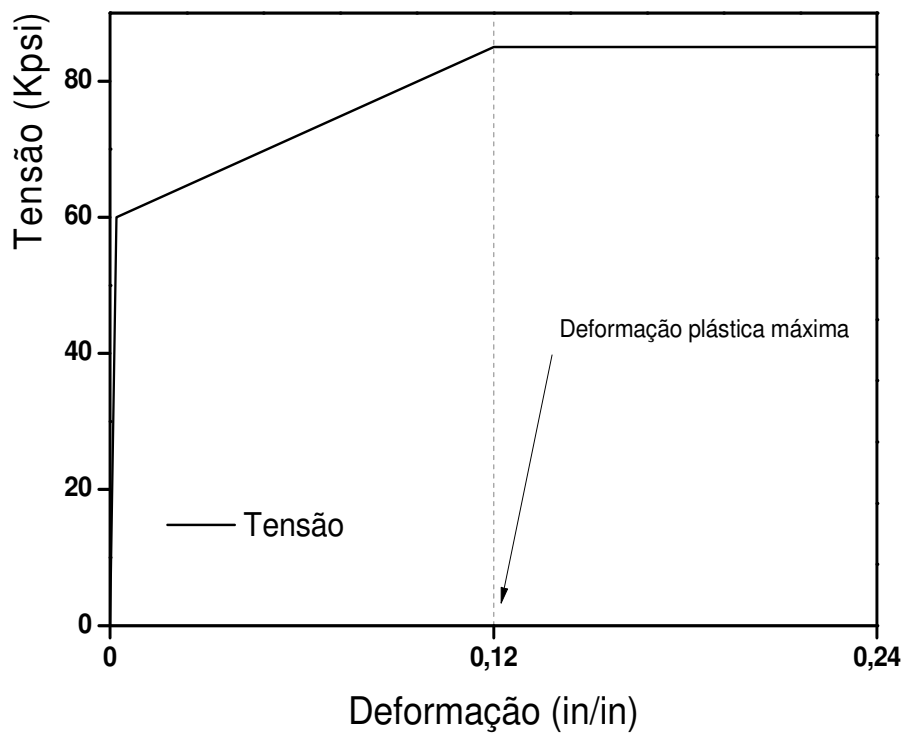


Figura 34 – Modelo de material utilizado nas análises numéricas

4.4 Discretização

Foram realizadas análises de sensibilidade de malha de elementos finitos quanto ao número de elementos utilizados tanto na espessura da parede quanto ao longo do comprimento curvo do cilindro, as quais demonstraram que a utilização de 4 a 8 elementos na espessura, conforme espessura da parede, e de 50 elementos para raio de curvatura três vezes o diâmetro externo ($R=3D_{ext}$) e 85 elementos para raio de curvatura cinco vezes o diâmetro externo ($R=5D_{ext}$) ao longo dos comprimentos curvos côncavo e convexo, produziram resultados adequados para o objetivo deste estudo.

A Figura 35 apresenta um resultado da análise de sensibilidade de malha para fechamento da estrutura com diâmetro interno de 6", espessura de parede de 1,25", raio de curvatura $R=3D_{ext}$, no qual pode ser observado que as malhas apresentam convergência nos resultados para deformação principal máxima. A malha 4, com 50 elementos no comprimento e 6 elementos na espessura, conforme Figura 36, foi a utilizada nas análises de fechamento da estrutura.

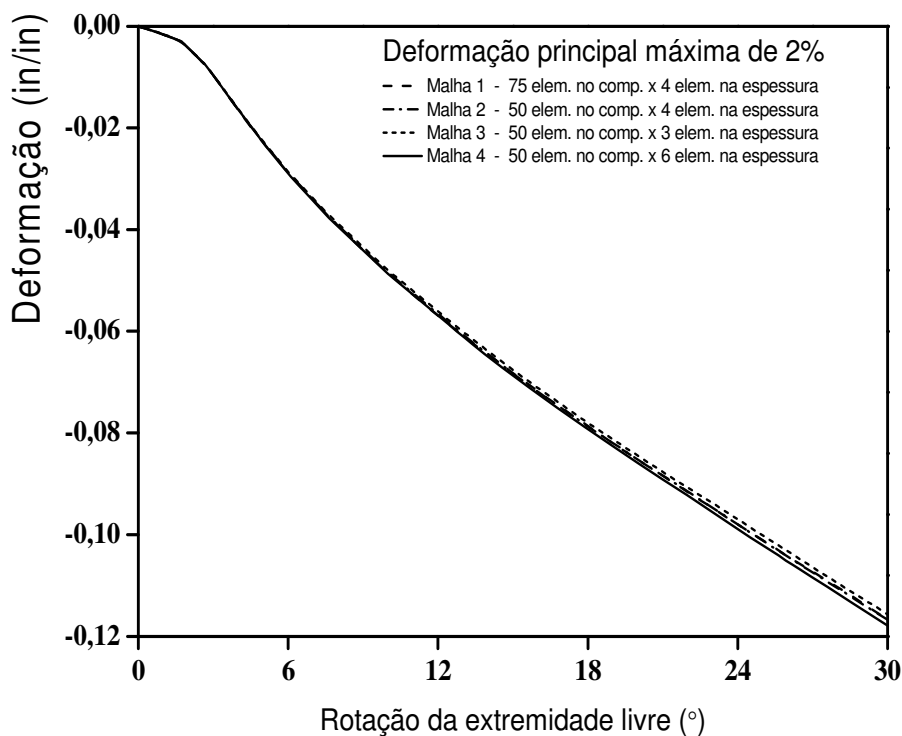


Figura 35 – Análise de sensibilidade de malha mostrando a convergência dos resultados para malhas diferentes

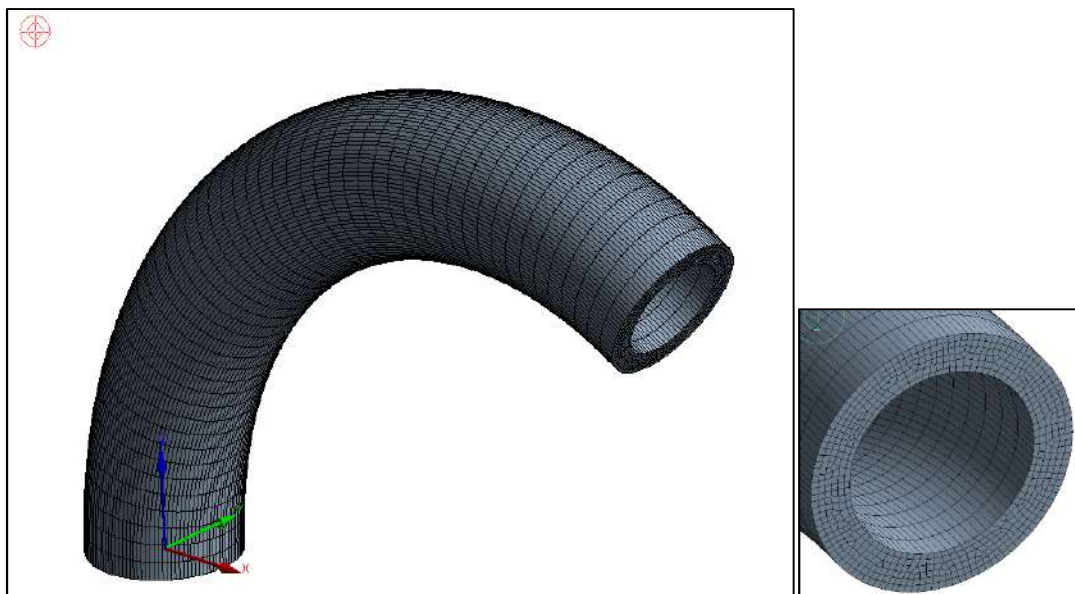


Figura 36 – Malha de elementos finitos para o modelo de cilindro curvo com 6” de diâmetro interno, 1,25” de espessura de parede e raio de curvatura de três vezes o diâmetro externo ($R=25,50''$) – malha 4 da análise de sensibilidade

Também foram realizadas análises de sensibilidade com elemento sólido (SOLID186) com vinte nós, com interpolação quadrática e integração reduzida e os resultados se mostraram quase idênticos aos obtidos com elemento SOLID185, para uma mesma quantidade de elementos.

Abaixo são apresentadas, na Figura 37 e na Figura 38, comparações de resultados para duas malhas, uma com elemento SOLID185 e outra com elemento SOLID186, tanto para fechamento quanto para abertura da estrutura, para deformação principal máxima e deformação plástica equivalente, mostrando que os resultados são quase idênticos.

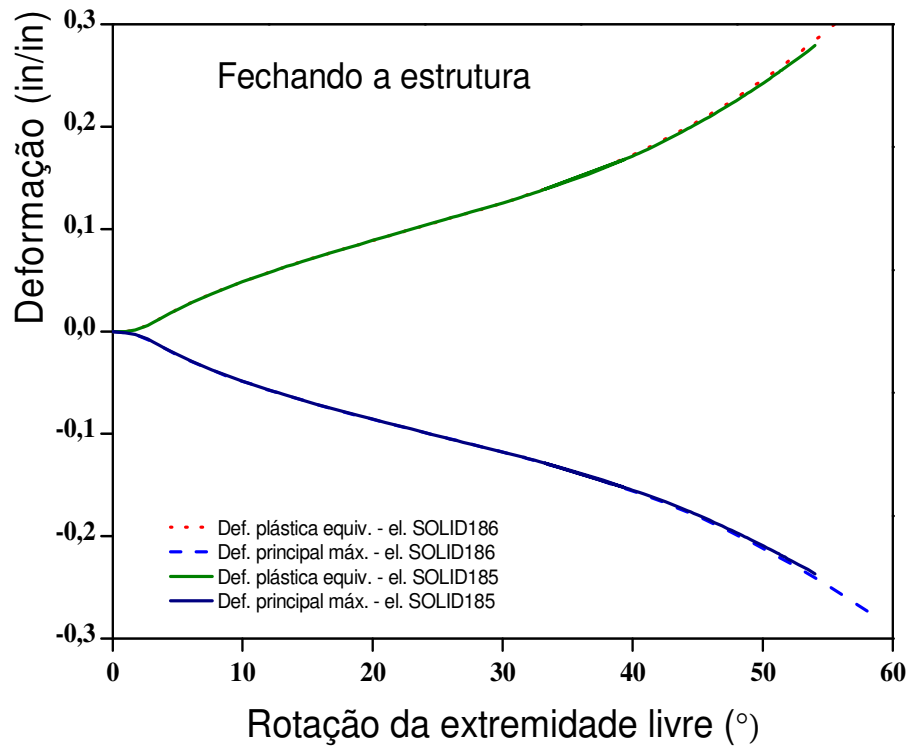


Figura 37 – Comparação entre as malhas com elementos SOLID185 e SOLID186 mostrando que os resultados são quase idênticos para fechamento da estrutura

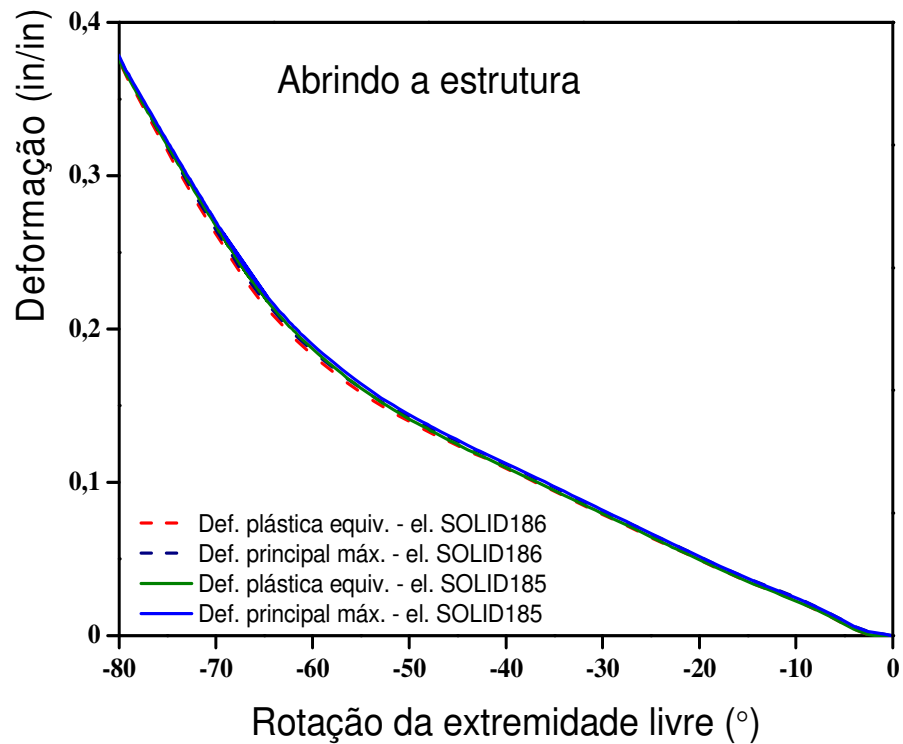


Figura 38 – Comparação entre as malhas com elementos SOLID185 e SOLID186 mostrando que os resultados são quase idênticos para abertura da estrutura

4.5 Carregamentos e condições de contorno

Os carregamentos e as condições de contorno foram aplicados no modelo de elementos finitos de forma a representarem de maneira mais apropriada as condições reais. Para tal, foram restritos todos os graus de liberdade de uma das extremidades do cilindro, colocando-o na condição de engastado, e na outra extremidade livre aplicou-se os carregamentos.

A aplicação dos carregamentos foi feita utilizando uma ferramenta do ANSYS [4] chamada *Remote Point*. Ela permite a criação de um ponto remoto no espaço e a conexão deste ao modelo sólido. A conexão deste ponto ao modelo sólido se dá por intermédio de *multipoint constraint equations* (MPC). Esta ferramenta permite o controle dos graus de liberdade usados para conectar o ponto remoto ao corpo. A conexão deste ponto remoto ao modelo sólido é rígida.

A superfície da extremidade livre foi mantida plana, não sofrendo ovalização, pois simula a rigidez de um flange, porém é permitido que esta superfície rotacione no plano de aplicação do carregamento, em torno do seu eixo saindo do plano. Foram utilizados carregamentos seguidores, os quais acompanham a deformação da estrutura mantendo suas direções em relação a superfície da extremidade livre, para representar a física do problema.

Durante a instalação do módulo de conexão vertical, com o duto flexível conectado, há condições críticas, as quais os carregamentos de momento fletor, força normal e força cortante, impostos pelo duto flexível, podem abrir ou fechar a estrutura conforme mostrado na Figura 39 e na Figura 40.

Os carregamentos impostos pelo duto flexível são obtidos nas análises específicas de instalação, cuja metodologia empregada nas análises considera carregamentos no plano. Durante a instalação, cuidados são tomados para que os carregamentos impostos pelo duto flexível sejam mantidos no plano. Há possibilidade durante a instalação de ocorrer carregamento fora do plano, principalmente quando o módulo de conexão está travado no *hub* do equipamento submarino e o duto flexível está suspenso pelo barco de instalação. Entretanto, o projeto do módulo de conexão

vertical é robusto o suficiente para absorver eventuais carregamentos fora do plano sem que ocorra deformações excessivas.

As condições de abertura e fechamento da estrutura são analisadas de forma independente, ou seja, considerando análise estática.

Abaixo são apresentadas as combinações dos carregamentos, conforme ilustrado na Figura 39 para fechamento da estrutura e na Figura 40 para abertura da estrutura.

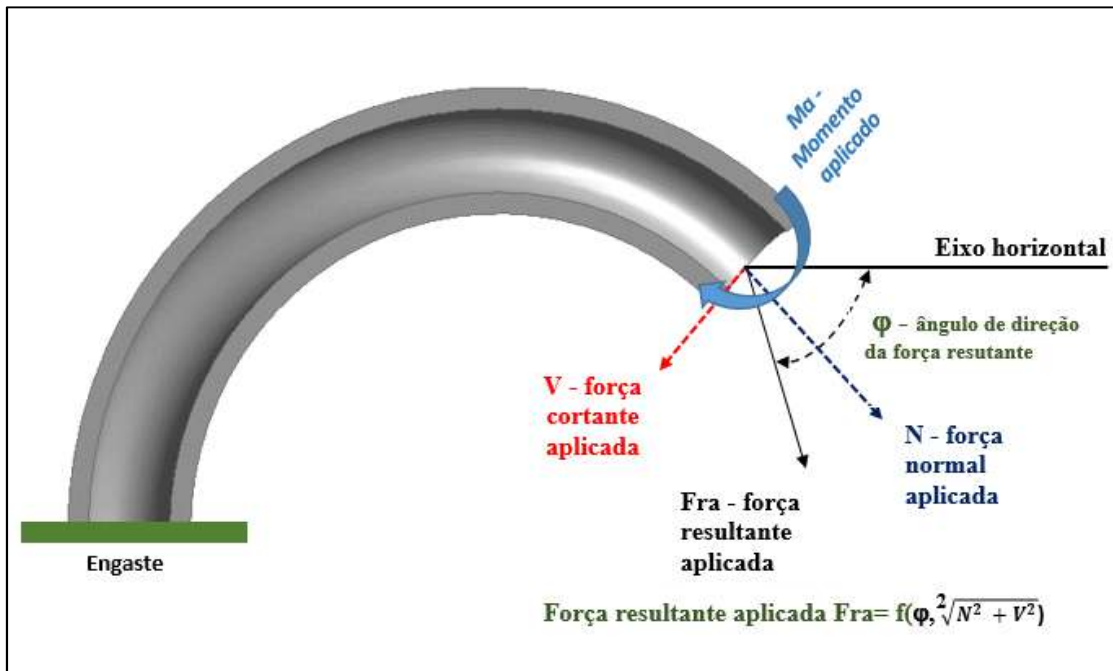


Figura 39 – Carregamentos e condições de contorno para fechamento da estrutura

A Tabela 5 mostra a relação entre as intensidades das forças normal e cortante e o ângulo de direção da força resultante para fechamento da estrutura.

Tabela 5 – Relações entre as forças normal e cortante e o ângulo de direção da força resultante para fechamento da estrutura

Força cortante (V)	Força normal (N)	Ângulo de direção da força resultante (φ)
0,00	1	-30,0
0,25	1	-44,0
0,50	1	-56,6
0,75	1	-66,9
1,00	1	-75,0
1,73	1	-90,0
3,73	1	-105,0
7,60	1	-112,5
1,00	0	-120,0

Para carregamentos de forças fechando a estrutura, φ varia de -30° a -120° , sendo que quando $\varphi = 30^\circ$ tem-se força normal pura e quando $\varphi=120$ tem-se força cortante pura.

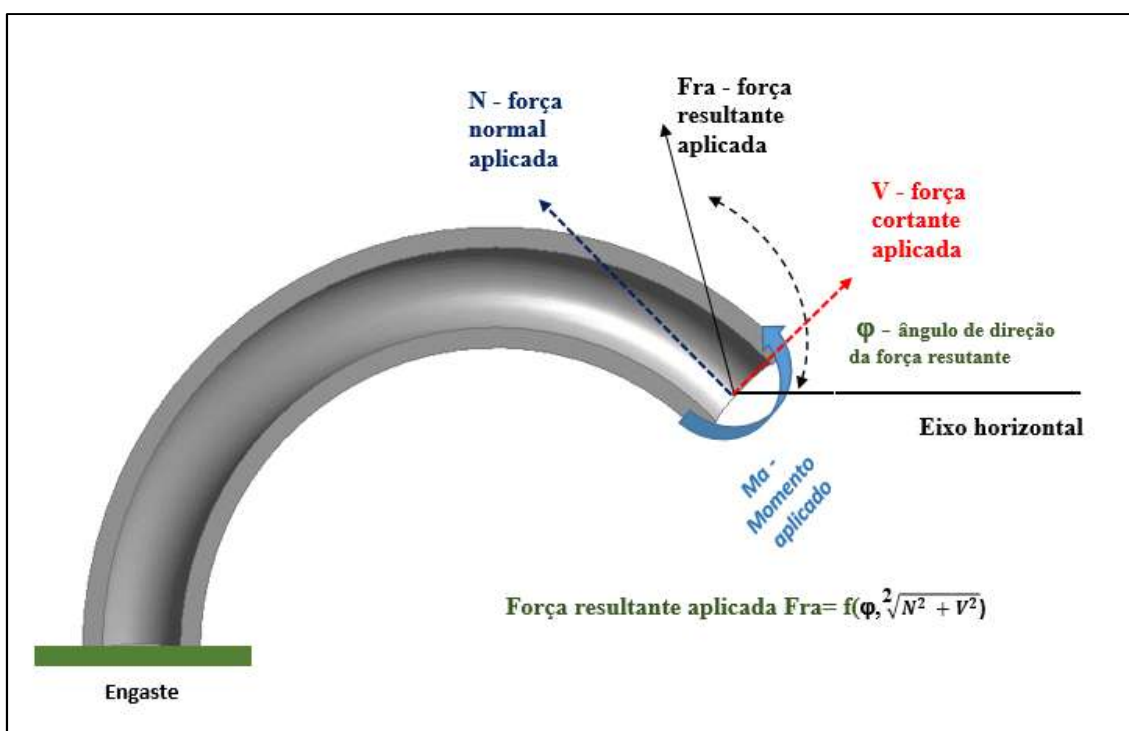


Figura 40 – Carregamentos e condições de contorno para abertura da estrutura

A Tabela 6 mostra a relação entre as intensidades das forças normal e cortante e o ângulo de direção da força resultante para abertura da estrutura.

Tabela 6 – Relações entre as forças normal e cortante e o ângulo de direção da força resultante para abertura da estrutura

Força cortante (V)	Força normal (N)	Ângulo de direção da força resultante (φ)
0,00	1	150,0
0,25	1	136,0
0,50	1	123,4
0,75	1	113,1
1,00	1	105,0
1,73	1	90,0
3,73	1	75,0
7,60	1	67,5
1,00	0	60,0

Para carregamentos de forças abrindo a estrutura, ϕ varia de $+60^\circ$ a $+150^\circ$, sendo que quando $\phi = 60^\circ$ tem-se força normal pura e quando $\phi=150$ tem-se força cortante pura.

Para os carregamentos combinados as seguintes combinações foram analisadas:

- i. Momento fletor com força normal;
- ii. Momento fletor com força cortante;
- iii. Força normal com força cortante; e
- iv. Momento fletor com forças normal e cortante.

As forças normal e cortante quando combinadas, entre si ou com momento fletor, fechando ou abrindo a estrutura seguiram as relações entre elas conforme Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente, ou seja: (a) $V=0,25xN$; (b) $V=0,50xN$; (c) $V=0,75xN$; (d) $V=N$; (e) $V=1,73xN$, (f) $V=3,73xN$ e (g) $V=7,60xN$. Para cada relação dessa fechando ou abrindo há uma força resultante e um ângulo da força resultante com o eixo horizontal que passa pelo ponto de aplicação da força.

A aplicação dos carregamentos foi de forma incremental, e quando combinados foram aplicados no mesmo passo de carga. Foi utilizado o método de solução de Riks com incrementos de força e de momento simultaneamente.

Para carregamentos combinados, aplicou-se um incremento de mesmo percentual do valor máximo do carregamento aplicado de momento e força. A Figura 41 exemplifica a aplicação de carregamentos combinados de momento fletor e força simultaneamente, na qual pode ser observado que para um mesmo número de passos de carga houve um mesmo incremento percentual de carregamento e as curvas dos carregamentos seguiram um mesmo padrão de comportamento.

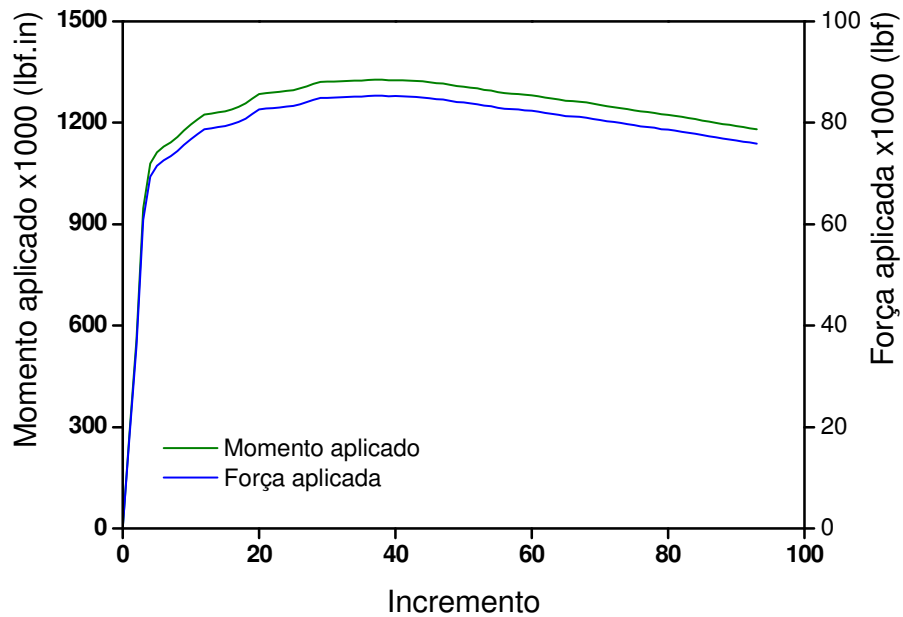


Figura 41 – Aplicação de carregamento incremental

5 Mecanismos de deformação de conectores sujeitos a carregamentos combinados

Os carregamentos combinados no plano impostos pelo duto flexível podem ser de intensidades suficientemente capazes de promoverem deformações plásticas na estrutura cilíndrica curva. A depender da distribuição e da magnitude das deformações a estrutura pode sofrer deformações plásticas excessivas ou perder a estabilidade estrutural.

O estudo dos mecanismos de deformação da estrutura cilíndrica curva foi feito de forma a verificar o comportamento da estrutura quando submetida a carregamentos puros e a carregamentos combinados. Os carregamentos puros no plano foram: de momento fletor; de força normal e de força cortante, tanto abrindo quanto fechando a estrutura e para raios de curvatura de três e cinco vezes o diâmetro externo da estrutura. Enquanto que os carregamentos combinados foram: de momento fletor com força normal; de momento fletor com força cortante; de momento fletor com forças normal e cortante e de força normal com força cortante.

Os raios de curvatura de três e cinco vezes o diâmetro externo são os praticados pela indústria de Óleo e Gás para o módulo de conexão vertical. O raio de três vezes o diâmetro externo é o mais utilizado no pescoço de ganso, entretanto, dutos que necessitam de passagem de determinado tipo de *pig* podem requerer raio de curvatura de cinco vezes o diâmetro externo.

Os carregamentos são apresentados neste estudo na forma normalizada, como se segue:

- i. Carregamento de momento normalizado = M_a / M_o , onde:

M_a é o momento aplicado na estrutura cilíndrica curva (lbf.in); e

M_o é o momento (lbf.in) que uma vez aplicado em um tubo reto de mesmo diâmetro interno, mesma espessura e de mesmo material da estrutura, porém com comportamento elástico-perfeitamente plástico, plastifica toda a seção do tubo reto.

$M_o = 4.t.rm^2. \sigma_o$, onde t é a espessura de parede, rm é o raio médio da seção do cilindro e σ_o é a tensão de escoamento do material do cilindro.

ii. Carregamento de força normalizado = Fra / Fo , onde:

Fra é a força resultante aplicada (lbf) na estrutura cilíndrica curva; e

Fo é a força normal (lbf) que uma vez aplicada em um tubo reto de mesmo diâmetro interno, mesma espessura e de mesmo material da estrutura, plastifica toda a seção do tubo reto.

$Fo = \sigma_o.\pi.(r^2-r_i^2)$, onde σ_o é a tensão de escoamento do material, r é o raio externo da seção do cilindro e r_i é o raio interno.

Nos estudos dos mecanismos de deformações foram utilizadas duas estruturas cilíndricas curvas:

- a) com diâmetro interno de 6", espessura de parede de 1,25" e raio de curvatura três vezes o diâmetro externo; e
- b) com diâmetro interno de 6", espessura de parede de 1,25" e raio de curvatura cinco vezes o diâmetro externo.

Os dois critérios de falhas principais adotados neste estudo foram: deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural, embora a norma ISO 13628-7 [3] adote também os critérios de deformação plástica equivalente de 10% e de funcionalidade. Pois, como as estruturas objetos deste estudo são livres de imperfeições e descontinuidades geométricas, o critério de deformação plástica equivalente de 10% permitiria deformações plásticas excessivas inaceitáveis para condição real.

Como o objetivo do estudo foi avaliar somente o pescoço de ganso, o critério de funcionalidade não foi aplicado, pois a sua aplicação requereria que os demais componentes do conector, que estivessem sujeitos aos carregamentos, fossem avaliados.

Entretanto, os resultados dos estudos apresentados para as duas estruturas nos itens (a) e (b) acima são comparados também com mais dois critérios de falhas: deformação plástica equivalente de 10% e deformação plástica equivalente máxima de 12%, a fim de permitir a verificação do quão conservador ou não é o critério de deformação principal máxima de 2%.

5.1 Carregamento de momento fletor puro no plano

O carregamento de momento fletor puro no plano foi aplicado na estrutura, a fim de avaliar o comportamento da estrutura até a perda da estabilidade estrutural e identificar os carregamentos responsáveis que causassem início de escoamento, deformação principal máxima de 2%, deformação equivalente plástica de 10%, deformação plástica equivalente máxima de 12% e perda de estabilidade estrutural.

5.1.1 Momento fletor aplicado fechando a estrutura

5.1.1.1 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de três vezes o diâmetro externo ($R=3D_{ext}$)

Com carregamento de momento fletor puro no plano fechando a estrutura, o escoamento iniciou nas superfícies externas do extrados e do intrados nas regiões convexas e côncava respectivamente, conforme mostrado na Figura 42.

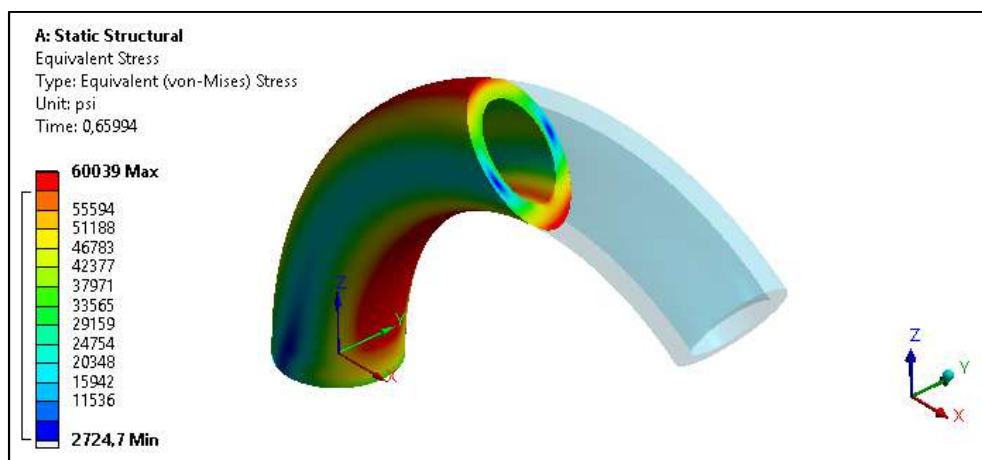


Figura 42 – Regiões de início de escoamento em vermelho

O carregamento que promoveu o início do escoamento (Ma/Mo) foi de 0,720 com rotação da extremidade livre de 1,75°.

A distribuição das deformações principais máximas compressivas, conforme Figura 43, mostra que a deformação de 2% ocorreu na região côncava da estrutura e na superfície externa do intrados. A região do *crown* permaneceu no regime elástico.

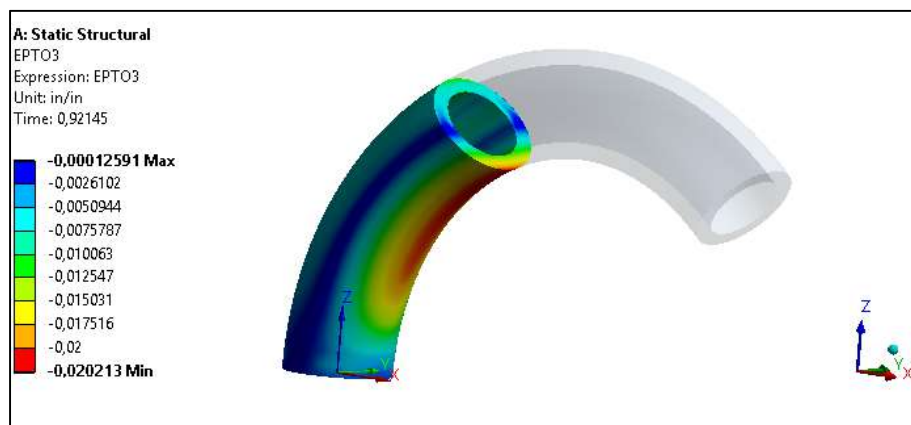


Figura 43 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2%

O carregamento que resultou na deformação principal máxima de 2% (Ma/Mo) foi de 1,005 com rotação da extremidade livre de 11,41°.

A distribuição das deformações plásticas equivalentes máximas até 10%, conforme Figura 44, mostra que, com exceção da região do *crown*, o restante da parede na seção central foi plastificada. E a deformação plástica equivalente de 10% ocorreu na região côncava da estrutura na superfície externa do intrados.

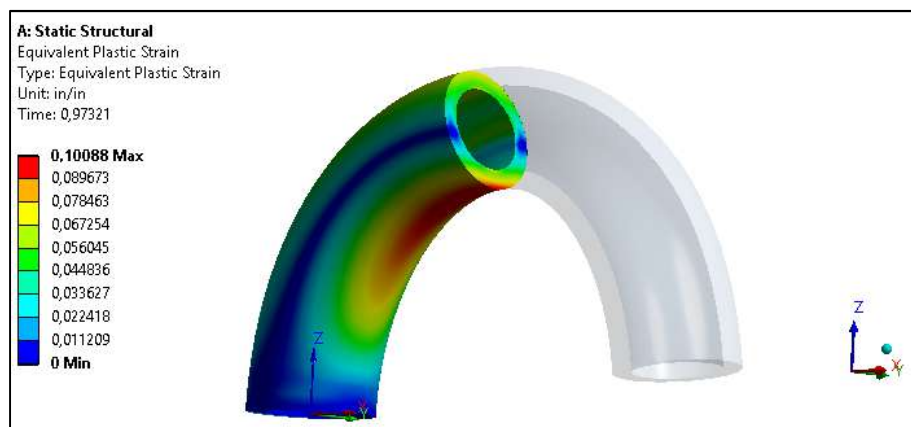


Figura 44 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes até 10%

A perda da estabilidade estrutural ocorreu com 10% de deformação plástica equivalente

O carregamento limite de estabilidade (Ma/Mo) foi de 1,062 com rotação da extremidade livre de 51,95°. A Figura 45 mostra a ovalização da seção central da estrutura onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural.

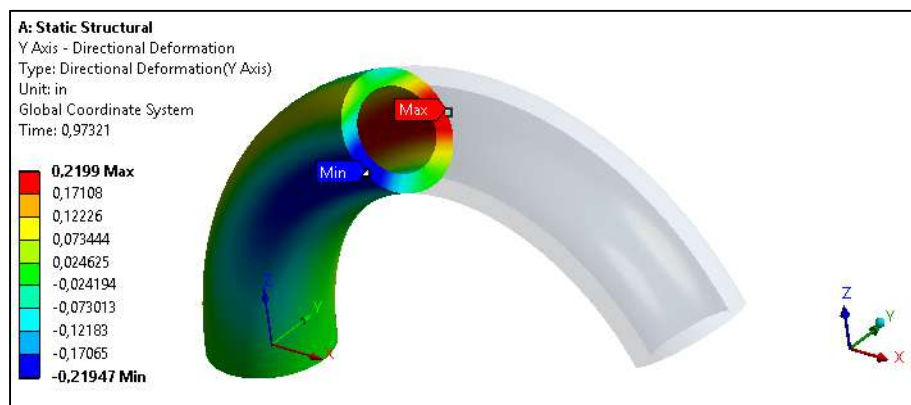


Figura 45 – Ovalização da seção central da estrutura onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural

A Figura 46 mostra o comportamento da estrutura submetida ao carregamento de momento fletor, na qual pode ser identificado o momento limite de estabilidade, o qual é o momento máximo que pode ser aplicado na estrutura sem que haja perda da estabilidade estrutural. No comportamento pós-perda da estabilidade ocorreu o aumento da rotação da extremidade livre com a diminuição do carregamento de momento.

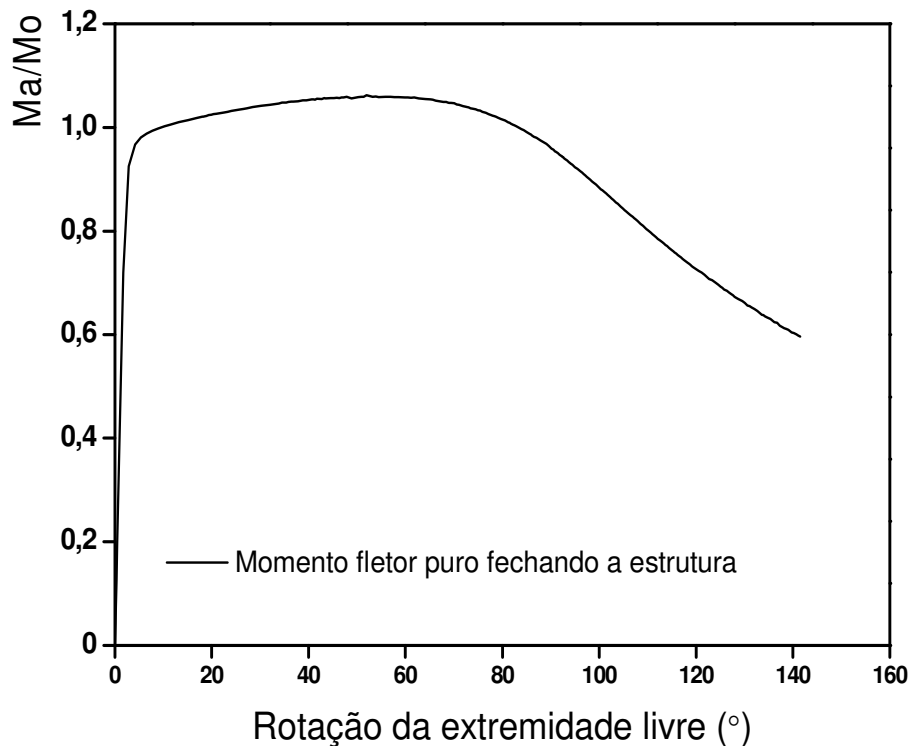


Figura 46 – Comportamento da estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ submetida ao carregamento de momento fletor puro fechando em função da rotação da extremidade livre

5.1.1.2 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de cinco vezes o diâmetro externo ($R=5D_{ext}$)

Assim como ocorreu para a estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$, o escoamento iniciou nas superfícies externas do extrados e do intrados nas regiões convexa e côncava respectivamente. A distribuição das deformações principais máximas compressivas mostrou que a deformação de 2% ocorreu na região côncava da estrutura e na superfície externa do intrados como também que a região do *crown* permaneceu no regime elástico.

O carregamento que promoveu o início do escoamento (Ma/Mo) foi de 0,761 com rotação da extremidade livre de $2,88^\circ$ e o que resultou na deformação principal máxima compressiva de 2% (Ma/Mo) foi de 1,027 com rotação da extremidade livre de $21,69^\circ$.

A distribuição das deformações plásticas equivalentes máximas até 10% mostrou que também para estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$, com exceção da região do *crown*, o restante da parede na seção central foi plastificada. E a deformação

plástica equivalente de 10% ocorreu na região côncava da estrutura na seção central na superfície externa do intrados. A rotação da extremidade livre foi de $112,36^\circ$.

Entretanto, diferentemente da estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$, a estrutura sofreu deformação plástica equivalente máxima de 12% antes de perder a estabilidade estrutural com 13,55%. A deformação plástica equivalente máxima de 12% ocorreu na região côncava e na seção central na superfície externa do intrados, a mesma região onde ocorreu a perda da estabilidade.

A deformação plástica equivalente máxima de 12% foi atingida com carregamento de (M_a/M_o) 1,137 com rotação da extremidade livre de $131,13^\circ$ e a perda da estabilidade estrutural com 1,139 e com rotação de $140,94^\circ$.

A Figura 47 mostra o comportamento da estrutura submetida ao carregamento de momento fletor, na qual pode ser identificado o momento limite de estabilidade, o qual é o momento máximo que pode ser aplicado na estrutura sem que haja perda da estabilidade estrutural. No comportamento pós-perda da estabilidade ocorreu o aumento da rotação da extremidade livre com a diminuição do carregamento de momento.

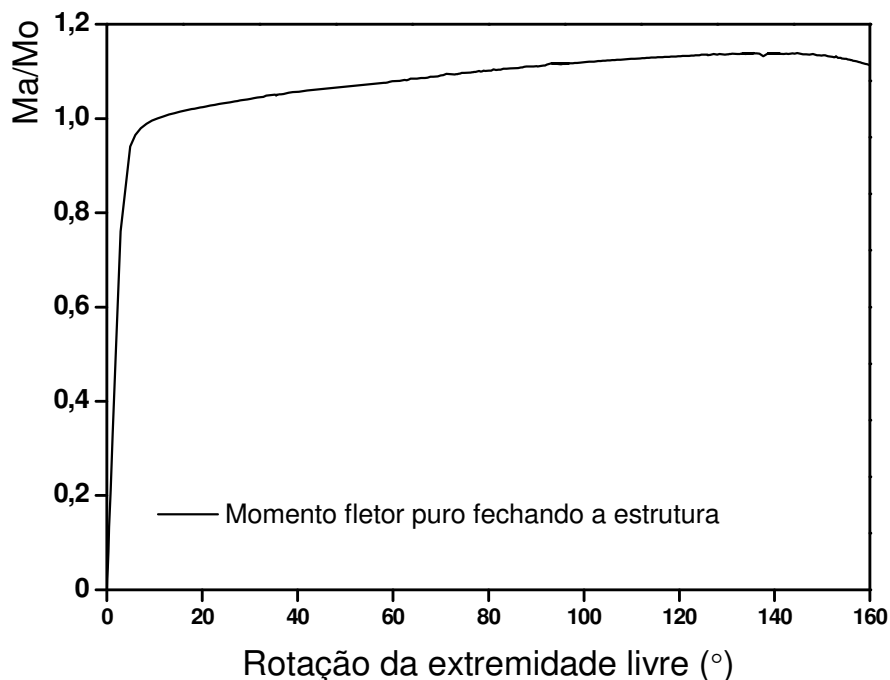


Figura 47 – Comportamento da estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$ submetida ao carregamento de momento fletor puro fechando em função da rotação da extremidade livre

5.1.2 Momento fletor aplicado abrindo a estrutura

5.1.2.1 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de três vezes o diâmetro externo ($R=3D_{ext}$)

Com carregamento de momento fletor puro no plano abrindo a estrutura, o escoamento iniciou nas superfícies externas do extrados e do intrados nas regiões convexas e côncavas respectivamente, ou seja, da mesma forma que ocorreu no fechamento, conforme mostrada na Figura 48.

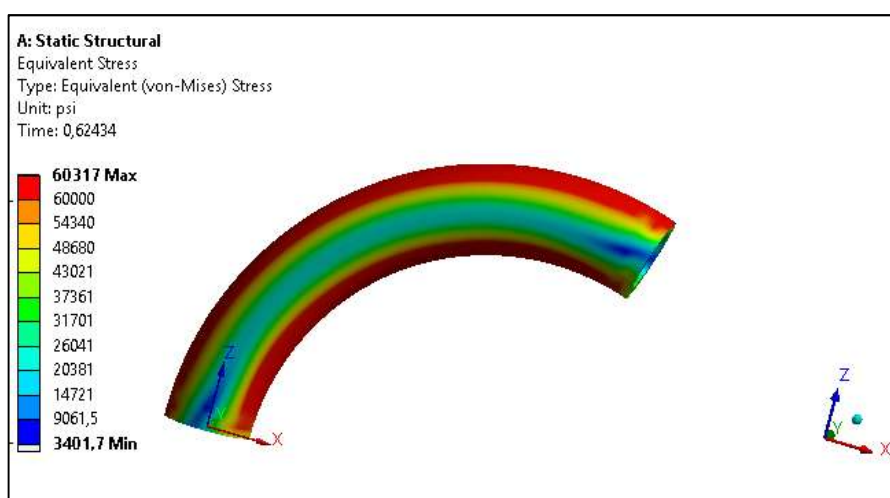


Figura 48 – Regiões de início de escoamento em vermelho

O carregamento que promoveu o início do escoamento (M_a/M_o) foi de 0,871 com rotação da extremidade livre de $2,07^\circ$ e o que resultou na deformação principal máxima de 2% (M_a/M_o) foi de 1,024 com rotação da extremidade livre de $10,23^\circ$.

A distribuição das deformações principais máximas trativas, conforme Figura 49, mostra que a deformação de 2% ocorreu em dois pontos na região côncava da estrutura e na superfície externa do intrados. A região do *crown* permaneceu no regime elástico.

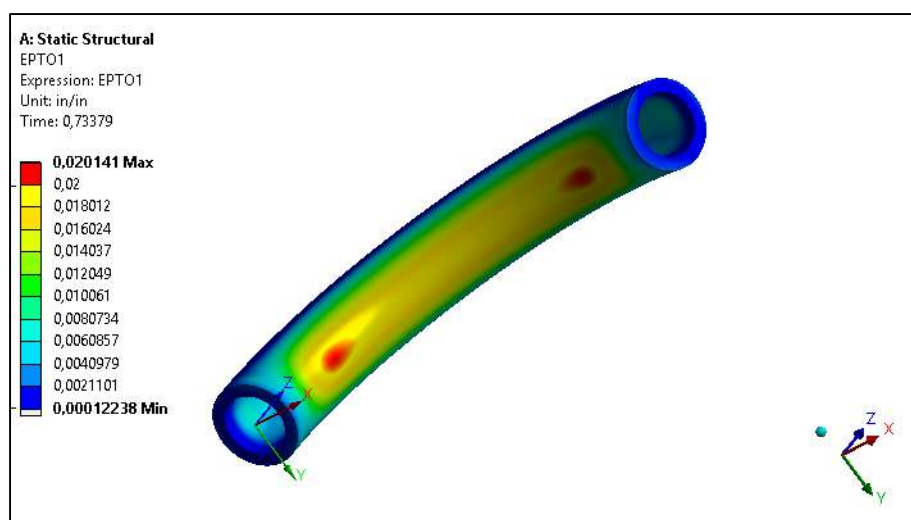


Figura 49 – Distribuição das deformações principais máximas trativas até 2%

A deformação plástica equivalente de 10% foi atingida com carregamento de (Ma/Mo) 1,198 com rotação da extremidade livre de $51,47^\circ$ e a máxima de 12% com 1,137 e com rotação da extremidade livre de $62,11^\circ$. Na Figura 50, pode ser observado que os 10% de deformação plástica equivalente foram atingidos em duas seções próximas as extremidades na região côncava da estrutura e na superfície do intrados. Enquanto que na Figura 51 pode ser observado que, à exceção do *crown*, o restante da parede foi todo plastificado.

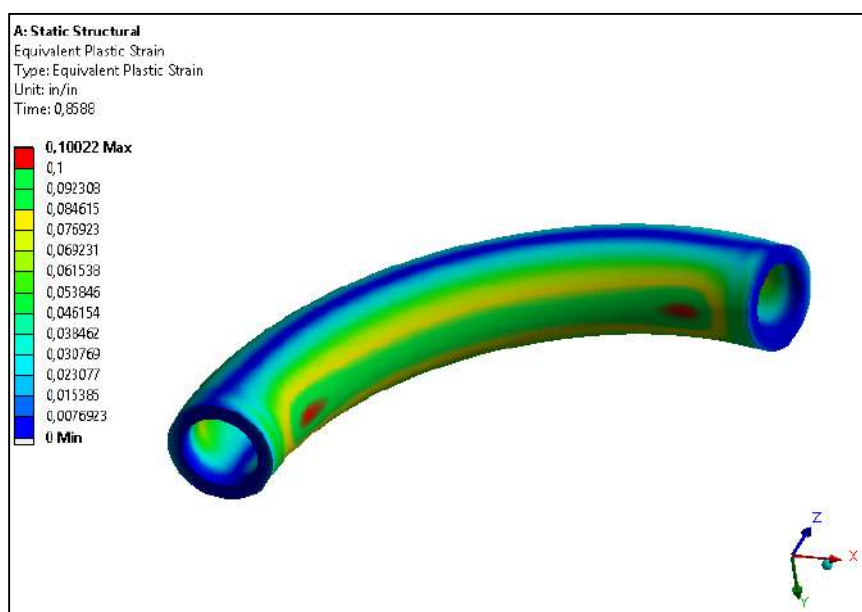


Figura 50 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes até 10%

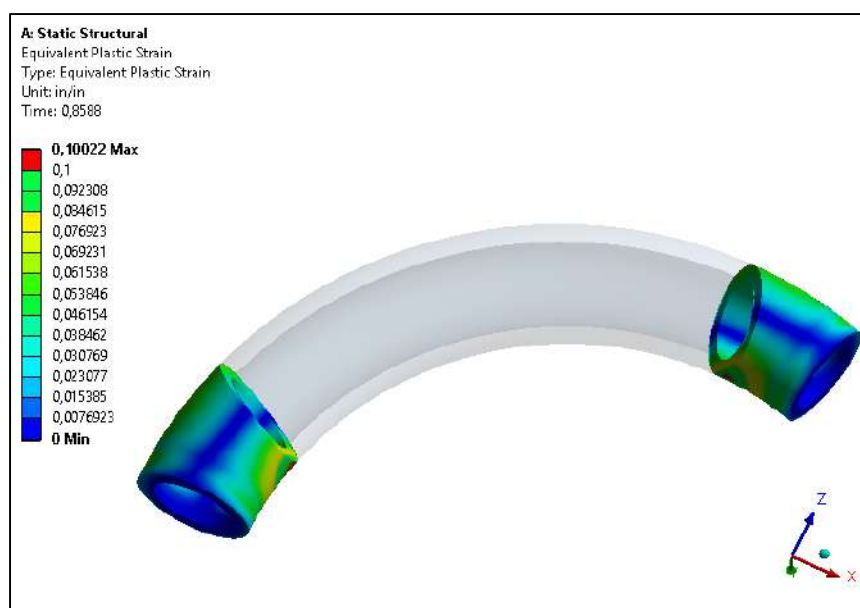


Figura 51 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes ao longo da espessura da parede nos pontos de deformações plásticas equivalentes de 10%

A deformação plástica equivalente máxima de 12% ocorreu com carregamento de (Ma/Mo) 1,137 com rotação da extremidade livre de 62.11° e a perda da estabilidade estrutural ocorreu com carregamento de (Ma/Mo) 1,376 com rotação da extremidade livre de $130,75^\circ$ e com deformação plástica equivalente de 26,64%.

Diferentemente do que ocorreu com a estrutura de raio de curvatura $R=3D_{ext}$ sob carregamento de momento fletor fechando a estrutura, na qual a perda da estabilidade estrutural ocorreu na região central da estrutura, para estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$ ocorreu na região próximo ao engaste para o carregamento abrindo a estrutura, conforme mostrado na Figura 52.

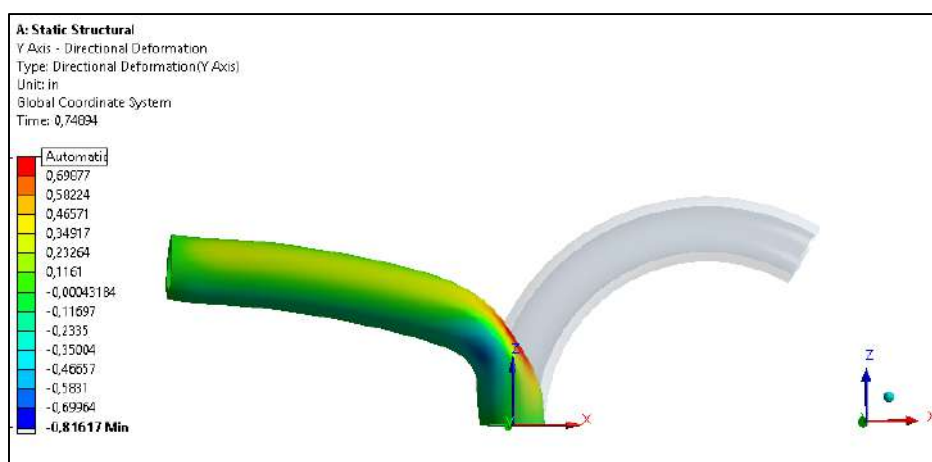


Figura 52 – Deformada na região próxima ao engaste, na qual o ocorreu a perda da estabilidade estrutural

A Figura 53 mostra o comportamento da estrutura submetida ao carregamento de momento fletor, na qual pode ser identificado o momento limite de estabilidade, o qual é o momento máximo que pode ser aplicado na estrutura sem que haja perda da estabilidade estrutural. No comportamento pós-perda da estabilidade ocorreu o aumento da deformação plástica equivalente com a diminuição do carregamento de momento.

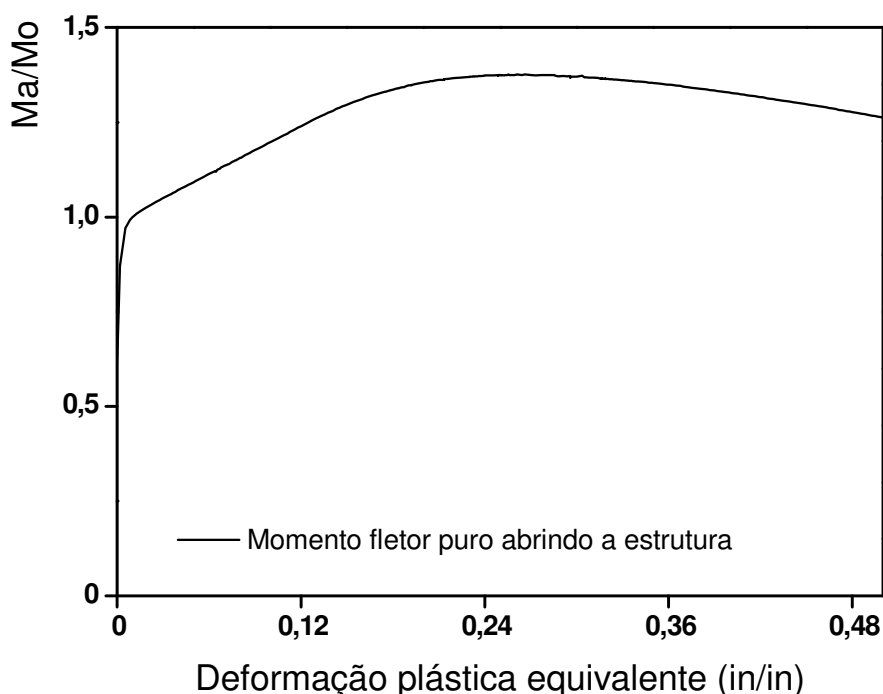


Figura 53 – Comportamento da estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ submetida ao carregamento de momento fletor puro abrindo em função da deformação equivalente plástica

5.1.2.2 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de cinco vezes o diâmetro externo ($R=5D_{ext}$)

Assim como ocorreu para a estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$, o escoamento iniciou nas superfícies externas do extrados e do intrados nas regiões convexas e côncava, respectivamente.

A distribuição das deformações principais máximas tratativas, conforme Figura 54, mostrou que a deformação de 2% ocorreu na região côncava da estrutura e na superfície externa do intrados nas seções próximas as extremidades como também que a região do *crown* permaneceu no regime elástico.

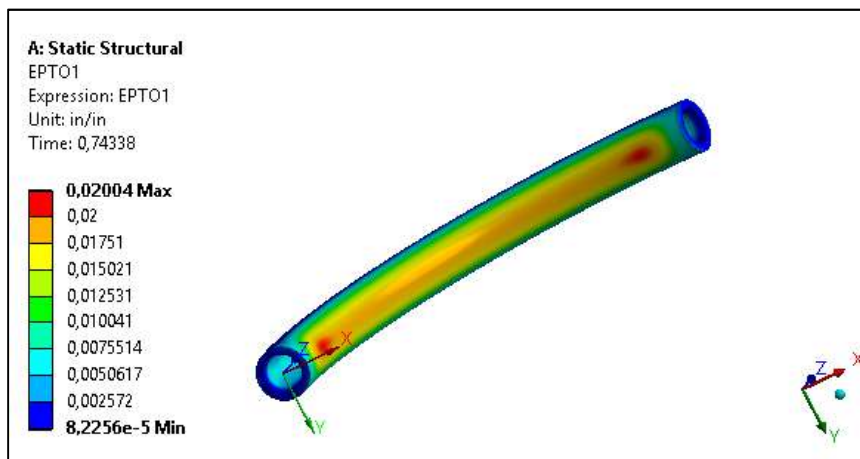


Figura 54 – Distribuição das deformações principais máximas até 2%

O carregamento que promoveu o início do escoamento (M_a/M_o) foi de 0,874 com rotação da extremidade livre de $3,43^\circ$ e o que resultou na deformação principal máxima de 2% (M_a/M_o) foi de 1,037 com rotação da extremidade livre de $19,27^\circ$.

A distribuição das deformações plásticas equivalentes máximas até 10%, conforme Figura 55, e assim como para estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$, mostra que os 10% de deformação plástica equivalente ocorreram em duas seções próximas as extremidades na região côncava da estrutura e na superfície externa do intrados bem como a região do *crown* nestas seções permaneceram no regime elástico, enquanto o restante da parede plastificou.

A deformação plástica equivalente de 10% foi atingida com um carregamento de (Ma Mo) de 1,214 com rotação da extremidade livre de 100,09°.

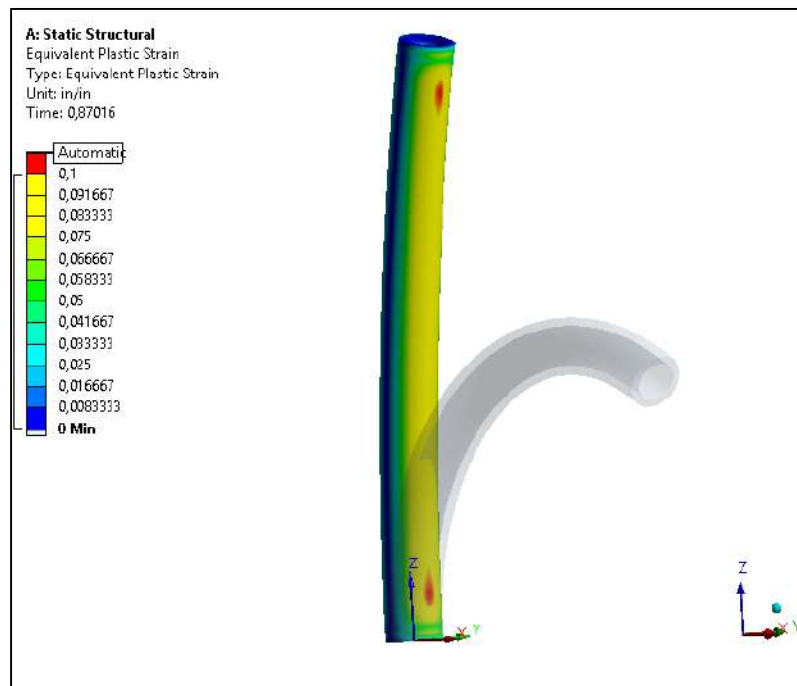


Figura 55 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes até 10%

A deformação plástica equivalente máxima de 12% ocorreu em duas seções próximas as extremidades na região côncava da estrutura e na superfície do intrados bem como a região do *crown* nestas seções permaneceram no regime elástico, enquanto o restante da parede plastificou.

A deformação plástica equivalente máxima de 12% foi atingida com carregamento de (Ma/Mo) de 1,256 com rotação da extremidade livre de 121,45°.

A perda da estabilidade estrutural ocorreu com 19,32% de deformação plástica equivalente e com carregamento de (Ma/Mo) de 1,338 e com rotação da extremidade livre de 161,09°.

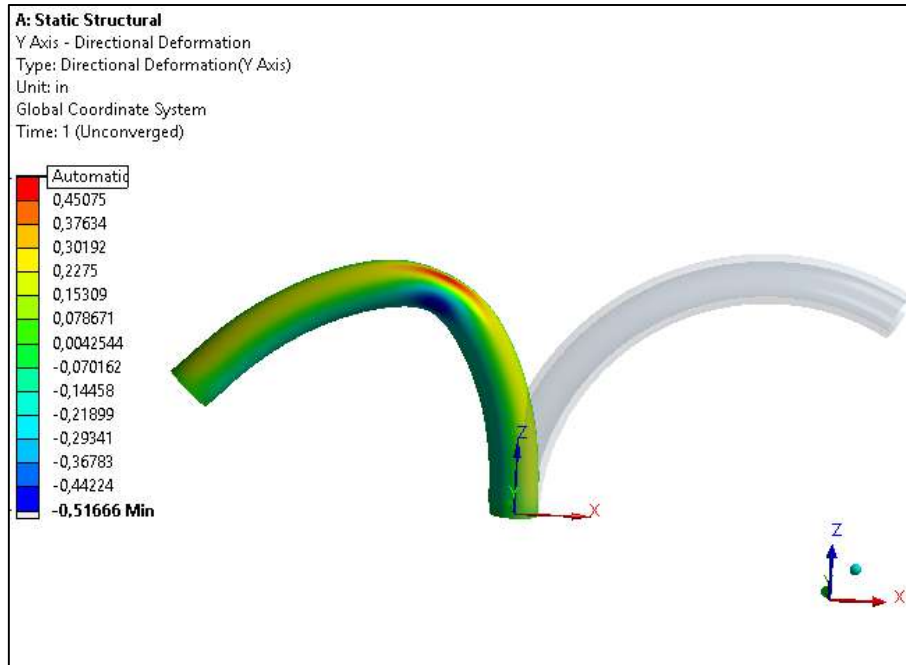


Figura 56 – Deformada da estrutura na perda da estabilidade

Assim como para a estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$, a estrutura perdeu a estabilidade estrutural na região central. Na Figura 56 pode-se observar a estrutura na condição de perda da estabilidade e a ovalização da seção na região central.

A Figura 57 mostra o comportamento da estrutura submetida ao carregamento de momento fletor, na qual pode ser identificado o momento limite de estabilidade, o qual é o momento máximo que pode ser aplicado na estrutura sem que haja perda da estabilidade estrutural. No comportamento pós-perda da estabilidade ocorreu o aumento da deformação plástica equivalente com a diminuição do carregamento de momento.

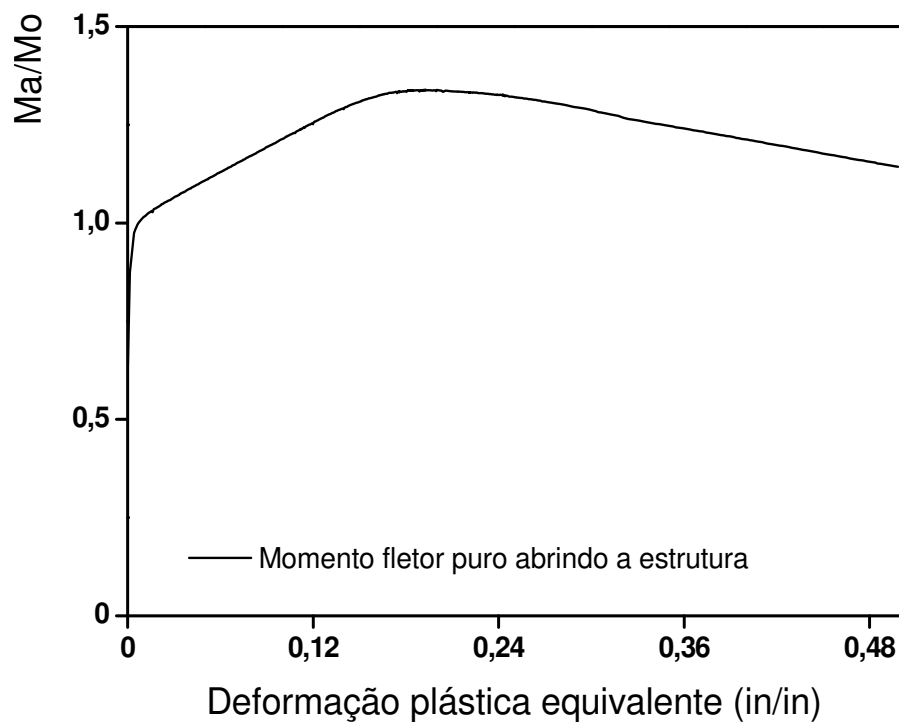


Figura 57 – Comportamento da estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$ submetida ao carregamento de momento fletor puro abrindo em função da deformação plástica equivalente

As Tabelas 7 e 8 mostram um resumo dos resultados obtidos no estudo das deformações para carregamento de momento fletor puro no plano.

Tabela 7 – Resultados para carregamento de momento fletor puro no plano

Carregamento	Condição	Rotação da extremidade livre (°)		Carregamento aplicado (Ma/Mo)	
		3Dext	5Dext	3Dext	5Dext
Fechando a estrutura	Raio de curvatura				
	Início de escoamento	1,75	2,88	0,720	0,761
	Deformação principal máxima de 2%	11,41	21,69	1,005	1,027
	Deformação plástica equivalente de 10%	51,95	112,36	1,062	1,128
	Deformação plástica equivalente máxima de 12%	59,91	131,13	1,058	1,137
	Limite de estabilidade estrutural	51,95	140,94	1,062	1,139
Abrindo a estrutura	Raio de curvatura				
	Início de escoamento	2,07	3,43	0,871	0,874
	Deformação principal máxima de 2%	10,23	19,27	1,024	1,037
	Deformação plástica equivalente de 10%	51,47	100,09	1,198	1,214
	Deformação plástica equivalente máxima de 12%	62,11	121,45	1,137	1,256
	Limite de estabilidade estrutural	130,75	161,09	1,376	1,338

Tabela 8 – Deformações plásticas equivalentes na perda da estabilidade estrutural para carregamento de momento fletor puro no plano

Momento fletor puro	R=3Dext	R=5Dext
Fechando a estrutura	10,09%	13,55%
Abrindo a estrutura	26,64%	19,32%

Com base nos resultados dos carregamentos de momento fletor puro no plano, conclui-se:

- a) Para todas as condições, os carregamentos na abertura foram maiores do que no fechamento;
- b) A estrutura com raio de curvatura R=5Dext, com exceção do limite de estabilidade estrutural na abertura, requereu carregamentos maiores;
- c) A estrutura com raio de curvatura R=3Dext perdeu a estabilidade estrutural no fechamento antes de atingir 12% de deformação plástica equivalente máxima. Após a perda da estabilidade alcançou a deformação equivalente máxima de 12%, o que explica o carregamento que provocou a deformação equivalente plástica máxima de 12% ter sido menor;
- d) Para adotar critério de falha de deformação plástica equivalente de 10%, deve-se verificar a suscetibilidade da estrutura quanto à perda da estabilidade como também a funcionalidade, pois foram necessárias rotações elevadas para atingir as deformações;
- e) As estruturas quando submetidas ao carregamento de momento fletor puro fechando são mais susceptíveis a perda da estabilidade estrutural do que quando submetidas ao carregamento de momento fletor puro abrindo;
- f) Deformação máxima principal de 2% requereu rotações em torno de 10° a 20°, as quais podem ser inviáveis para uma estrutura manter seu funcionamento adequado; e
- g) A estrutura perdeu a estabilidade estrutural próxima ao engaste para abertura com raio de curvatura R=3Dext, enquanto que para fechamento com raios de curvatura de R=3Dext e R=5Dext e para abertura com raio de curvatura R=5Dext perdeu a estabilidade estrutural na região central.

5.2 Carregamentos de forças normal pura e cortante pura

O carregamento de força pura no plano foi aplicado na estrutura, a fim de avaliar o comportamento da estrutura até a perda da estabilidade estrutural e identificar os carregamentos responsáveis que causassem início de escoamento, deformação principal máxima de 2%, deformação equivalente plástica de 10%, deformação plástica equivalente máxima de 12% e a perda da estabilidade estrutural.

5.2.1 Carregamento de força pura fechando a estrutura

Com a aplicação da força normal pura fechando a estrutura, verificou-se que tanto para raio de curvatura de 3Dext quanto para 5Dext a estrutura atingiu a deformação plástica equivalente máxima de 12% antes de perder a estabilidade estrutural.

5.2.1.1 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de três vezes o diâmetro externo ($R=3D_{ext}$)

5.2.1.1.1 Força normal pura

Com carregamento de força normal pura no plano fechando a estrutura, o escoamento iniciou na região do engaste, conforme mostrado na Figura 58.



Figura 58 – Região de início do escoamento em vermelho

O carregamento que iniciou escoamento (Fra/Fo) foi de 0,061 com rotação da extremidade livre de $1,05^\circ$.

A distribuição das deformações principais máximas trativas até 2%, na Figura 59, mostra que a deformação de 2% ocorreu na região do engaste e na superfície externa do extrados. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

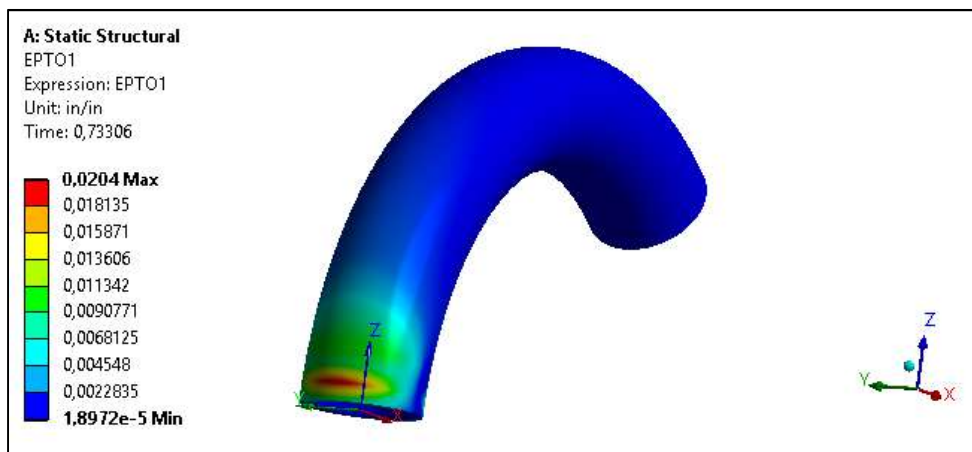


Figura 59 – Distribuição das deformações principais máximas trativas até 2%

O carregamento que resultou na deformação principal máxima trativa de 2% (Fra/Fo) foi de 0,069 com rotação da superfície livre foi de $2,03^\circ$.

A deformação plástica equivalente máxima de 10% ocorreu na mesma região e superfície da deformação principal máxima trativa de 2% mostrada na Figura 59. O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente de 10% foi (Fra/Fo) de 0,078 com rotação da superfície livre foi de $8,83^\circ$.

A deformação plástica equivalente máxima de 12% também ocorreu na mesma região e superfície da deformação principal máxima trativa de 2% mostrada na Figura 59 acima. O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente máxima de 12% foi (Fra/Fo) de 0,080 com rotação da superfície livre foi de $10,85^\circ$.

A perda da estabilidade estrutural ocorreu na região próxima ao engaste com carregamento (F_r/F_o) de 0,086 com rotação da extremidade livre de $24,92^\circ$ e com deformação plástica equivalente de 25%. A Figura 60 mostra a ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural.

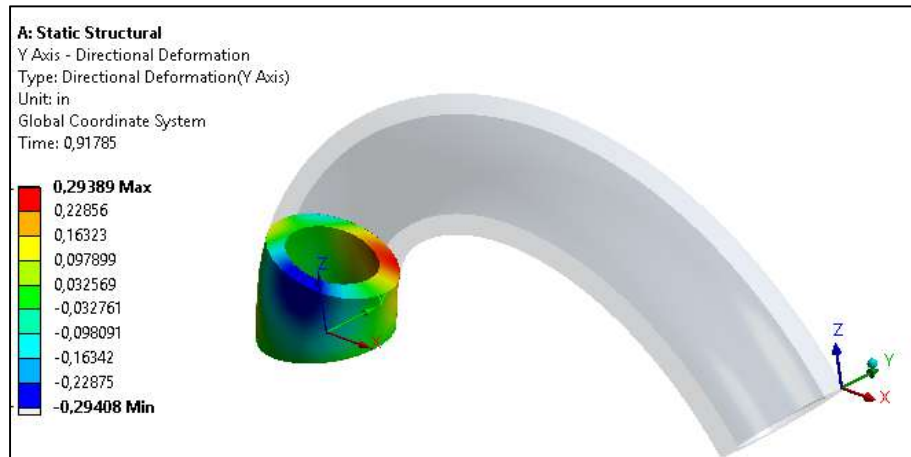


Figura 60 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural

5.2.1.1.2 Foça cortante pura

Com carregamento de força cortante pura no plano fechando a estrutura, o escoamento iniciou na região entre o engaste a região central na superfície externa do intrados, conforme mostrado na Figura 61.

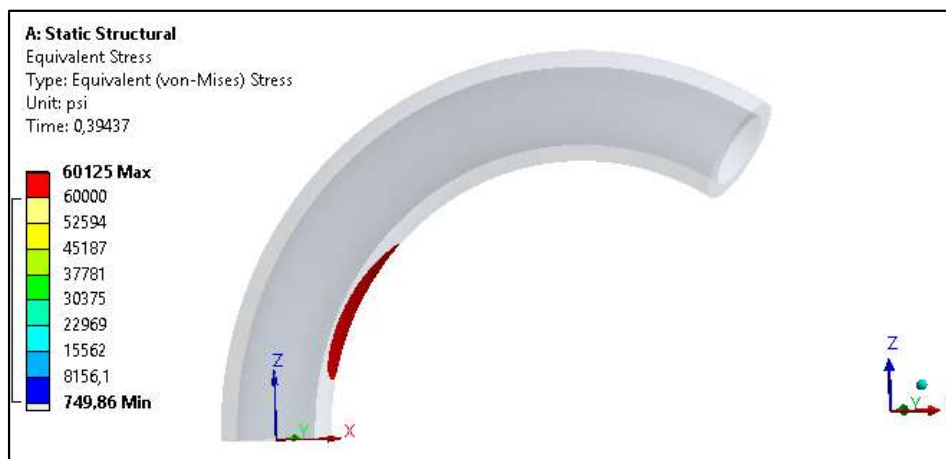


Figura 61 – Região de início do escoamento em vermelho

O carregamento que promoveu o início do escoamento (F_{ra}/F_o) foi de 0,069 com rotação da extremidade livre de $1,34^\circ$.

A distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2%, na Figura 62, mostra que a deformação de 2% ocorreu na região entre o engaste e a região central na superfície externa do intrados. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

O carregamento que promoveu a deformação principal máxima compressiva de 2% (F_{ra}/F_o) foi de 0,094 com rotação da superfície livre foi de $4,09^\circ$.

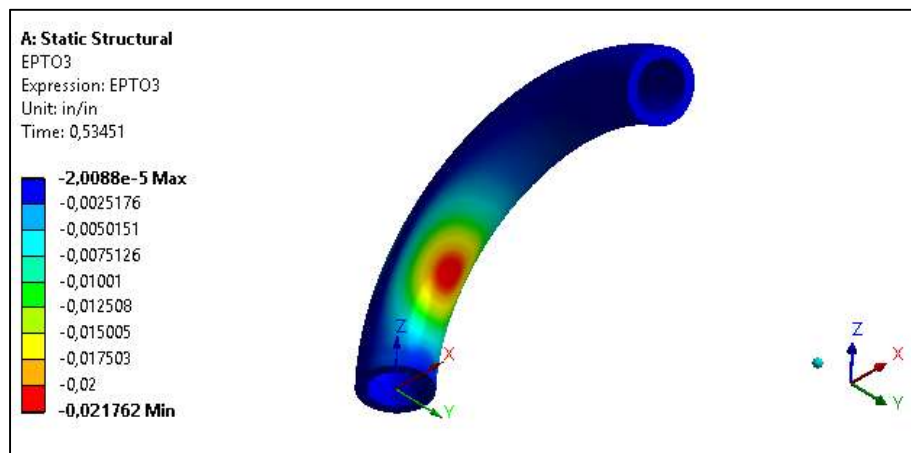


Figura 62 – Distribuição das deformações principais máximas trativas até 2%

A deformação plástica equivalente máxima de 10% ocorreu na região entre o engaste e a região central na superfície externa do intrados, conforme Figura 63. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

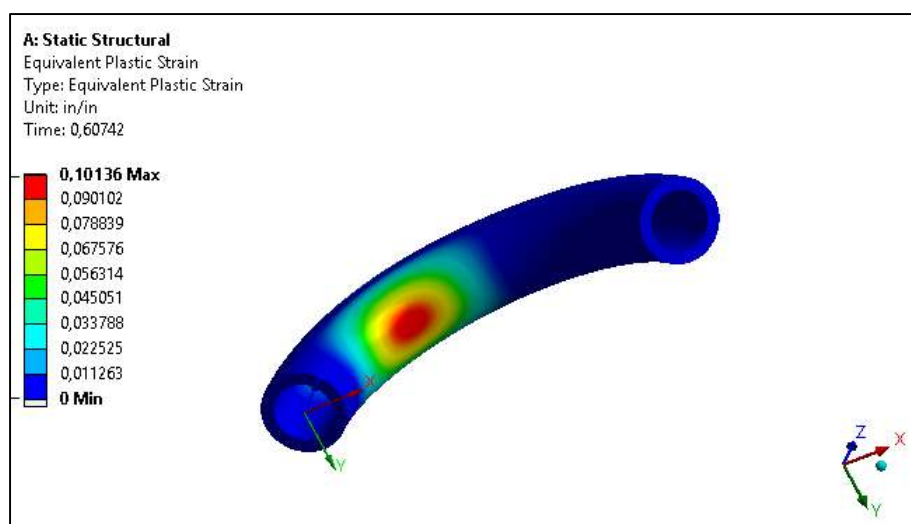


Figura 63 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 10%

O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente de 10% foi (F_r/F_o) de 0,107 com rotação da superfície livre de $17,43^\circ$.

A deformação plástica equivalente máxima de 12% ocorreu na região entre o engaste e a região central na superfície externa do intrados, conforme Figura 64. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

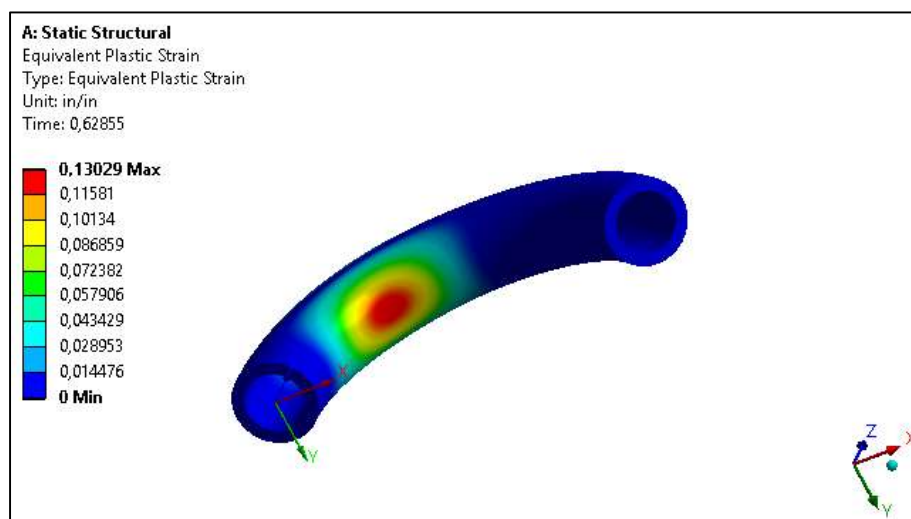


Figura 64 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 12%

O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente máxima de 12% foi (F_r/F_o) 0,109 com rotação da superfície livre de $22,65^\circ$.

A perda da estabilidade estrutural ocorreu conforme mostrada na Figura 65 e com carregamento de (F_r/F_o) de 0,115 com rotação da extremidade livre de $36,10^\circ$ e com deformação plástica equivalente de 23,14%.

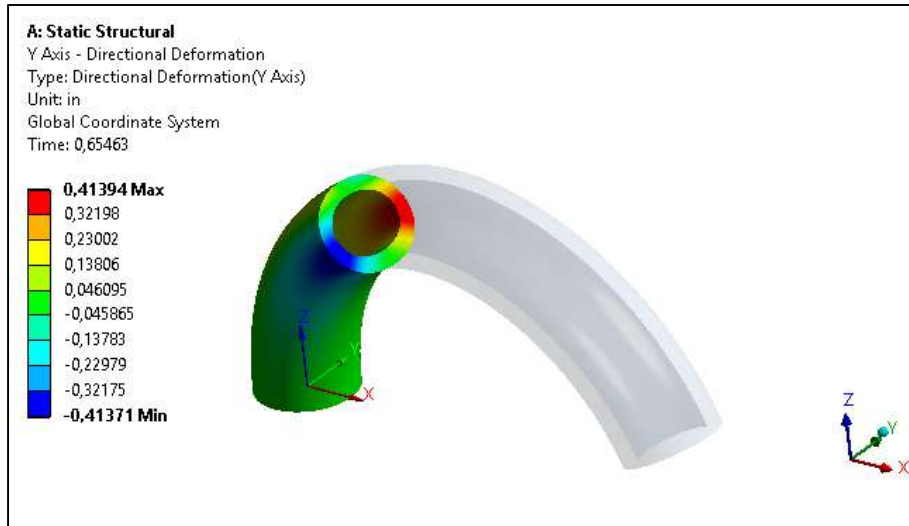


Figura 65 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade

5.2.1.2 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de cinco vezes o diâmetro externo ($R=5D_{ext}$)

5.2.1.2.1 Força normal pura

Com carregamento de força normal pura no plano fechando a estrutura, o escoamento iniciou nas superfícies externas do extrados e do intrados, na região do engaste, assim como ocorreu para a estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$. O carregamento que iniciou escoamento (F_r/F_o) foi de 0,034 com rotação da extremidade livre de $1,52^\circ$.

A distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2%, na Figura 66, mostra que a deformação de 2% ocorreu na região do engaste e na superfície externa do intrados. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

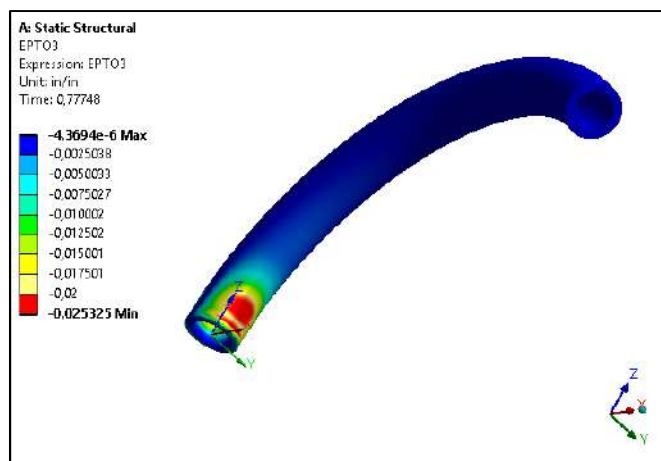


Figura 66 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2%

O carregamento que resultou na deformação principal máxima compressiva de 2% (F_{ra}/F_o) foi de 0,040 com rotação da superfície livre foi de $3,67^\circ$.

A deformação plástica equivalente máxima de 10% ocorreu na região do engaste e na superfície externa do extrados, conforme Figura 67. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou. O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente de 10% foi (F_{ra}/F_o) de 0,046 e a rotação da superfície livre foi de $14,50^\circ$.

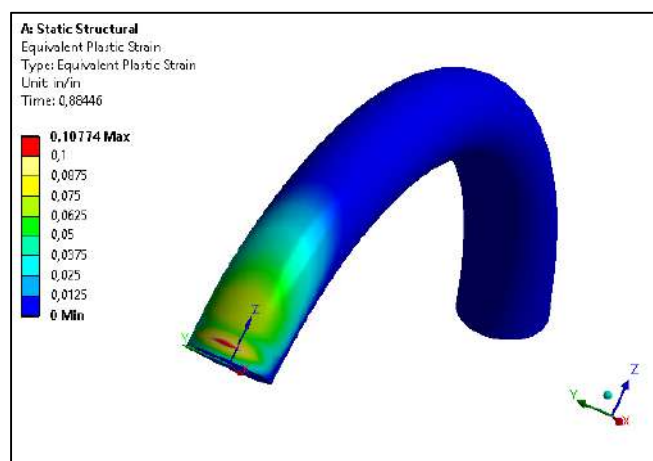


Figura 67 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes até 10%

A deformação plástica equivalente máxima de 12% ocorreu na mesma região e superfície da deformação plástica equivalente máxima de 10%. O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente máxima de 12% foi (F_{ra}/F_o) de 0,480 e a rotação da superfície livre foi de $16,61^\circ$.

A perda da estabilidade estrutural ocorreu na região próxima ao engaste, conforme Figura 68, com carregamento (F_r/F_o) de 0,050 com rotação da extremidade livre de $33,45^\circ$ e com deformação plástica equivalente de 22,90%.

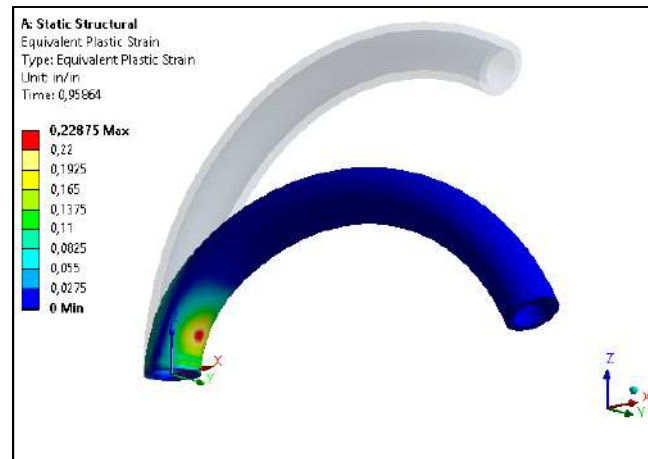


Figura 68 – Região onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural

5.2.1.2 Força cortante pura

Com carregamento de força cortante pura no plano fechando a estrutura, o escoamento iniciou nas superfícies externa do intrados e externa do extrados, da região próxima ao engaste até a região central, conforme mostrado na Figura 69.

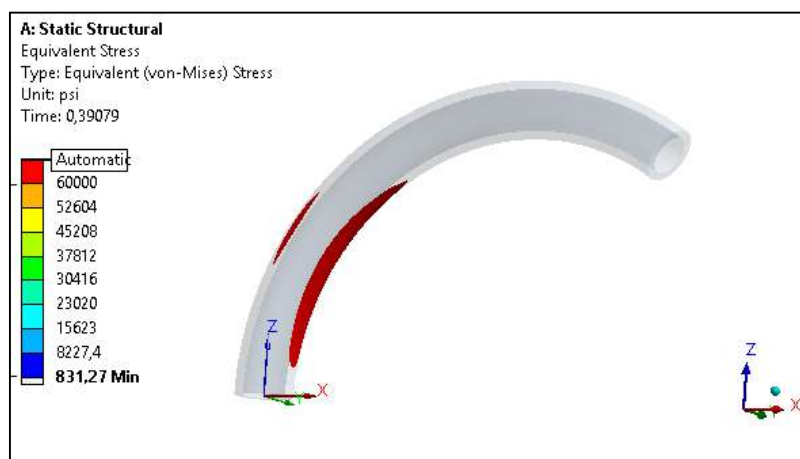


Figura 69 – Região de início de escoamento em vermelho

O carregamento que promoveu o início do escoamento (F_r/F_o) foi de 0,046 com rotação da extremidade livre de $2,31^\circ$.

A distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2%, conforme Figura 70, mostra que a deformação de 2% ocorreu na região intermediária entre o engaste e a região central na superfície externa do intrados. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

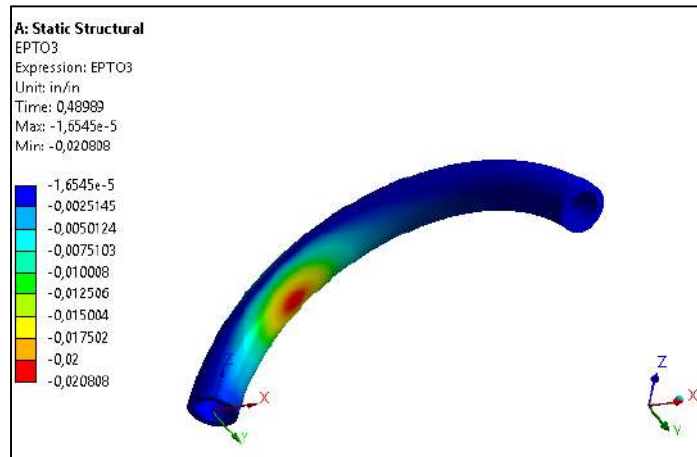


Figura 70 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2%

O carregamento que resultou na deformação principal máxima de 2% (F_{ra}/F_o) foi de 0,057 com rotação da superfície livre foi de $6,54^\circ$.

A distribuição das deformações plásticas equivalentes na Figura 71, mostra que a deformação de 10% ocorreu na região próxima da região central e na superfície externa do intrados. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou. O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente de 10% foi (F_{ra}/F_o) de 0,069 com rotação da superfície livre foi de $31,27^\circ$.

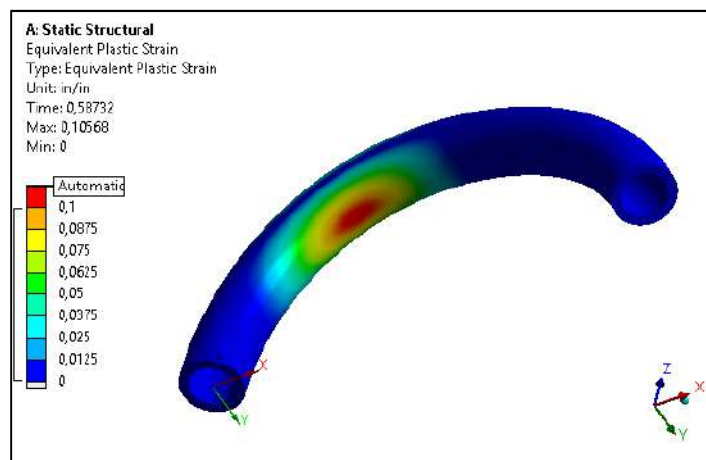


Figura 71 – Distribuição das deformações plásticas equivalentes até 10%

A deformação plástica equivalente máxima de 12% ocorreu na mesma região e superfície da deformação plástica equivalente máxima de 10%. O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente máxima de 12% foi (F_r/F_o) de 0,071 com rotação da superfície livre foi de $36,74^\circ$.

A perda da estabilidade estrutural ocorreu na região central, conforme Figura 72, com carregamento (F_r/F_o) de 0,076 com rotação da extremidade livre de $52,72^\circ$ e com deformação plástica equivalente de 22,50%.

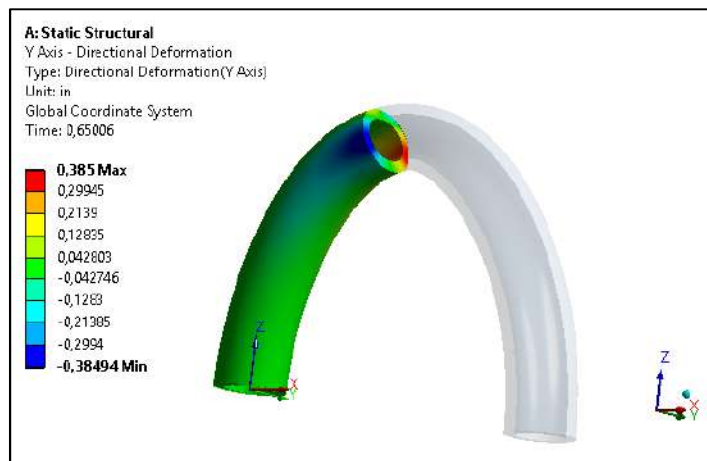


Figura 72 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural

5.2.2 Força pura aplicada abrindo a estrutura

Com a aplicação da força pura abrindo a estrutura, verificou-se que tanto para raio de curvatura $R=3D_{ext}$ quanto para $R=5D_{ext}$ a estrutura atingiu a deformação plástica equivalente máxima de 12% antes de perder a estabilidade estrutural.

5.2.2.1 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de três vezes o diâmetro externo ($R=3D_{ext}$)

5.2.2.1.1 Força normal pura

Com carregamento de força normal pura no plano abrindo a estrutura, o escoamento iniciou na região do engaste, conforme mostrado na Figura 73.



Figura 73 – Região de início do escoamento em vermelho

O carregamento que iniciou escoamento (F_{ra}/F_o) foi de 0,063 com rotação da extremidade livre de $1,12^\circ$.

A distribuição das deformações principais máximas trativas até 2%, na Figura 74, mostra que a deformação de 2% ocorreu na região do engaste e na superfície externa do extrados. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

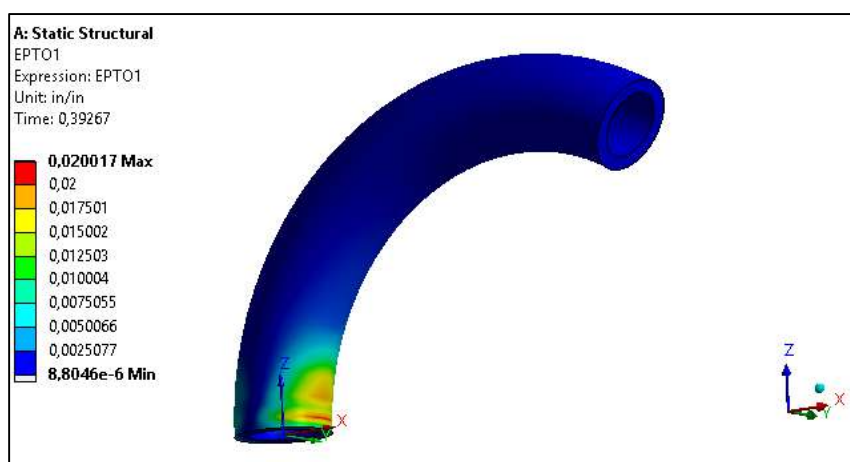


Figura 74 – Distribuição das deformações principais máximas trativas até 2%

O carregamento que resultou na deformação principal máxima trativa de 2% (Fra/Fo) foi de 0,069 com rotação da superfície livre foi de 2,09°.

A deformação plástica equivalente máxima de 10% ocorreu na mesma região e superfície da deformação principal máxima trativa de 2% mostrada na Figura 74. O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente de 10% foi (Fra/Fo) de 0,079 com rotação da superfície livre foi de 8,34°.

A deformação plástica equivalente máxima de 12% também ocorreu na mesma região e superfície da deformação principal máxima trativa de 2% mostrada na Figura 74. O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente máxima de 12% foi (Fra/Fo) de 0,081 com rotação da superfície livre foi de 9,56°.

A perda da estabilidade estrutural ocorreu na região próxima ao engaste com carregamento (Fra/Fo) de 0,090 com rotação da extremidade livre de 24,45° e com deformação plástica equivalente de 33,62%. A Figura 75 mostra a ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural.

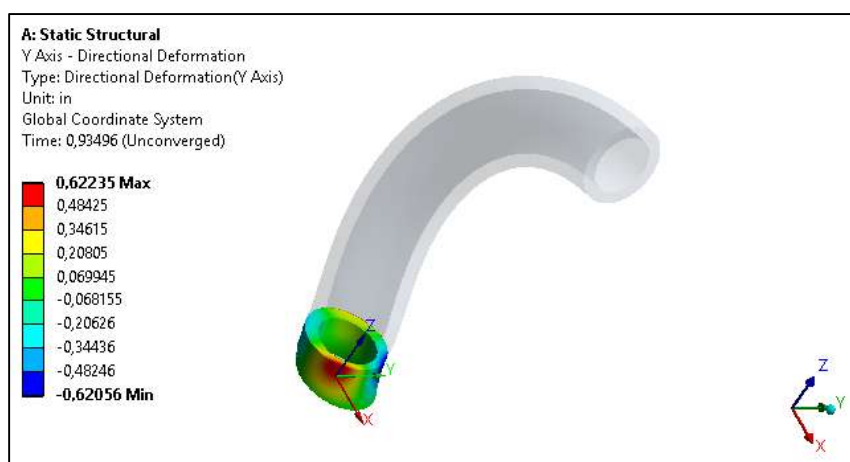


Figura 75 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural

5.2.2.1.2 Força cortante pura

Com carregamento de força cortante pura no plano abrindo a estrutura, o escoamento iniciou na região entre o engaste a região central, conforme mostrado na Figura 78.

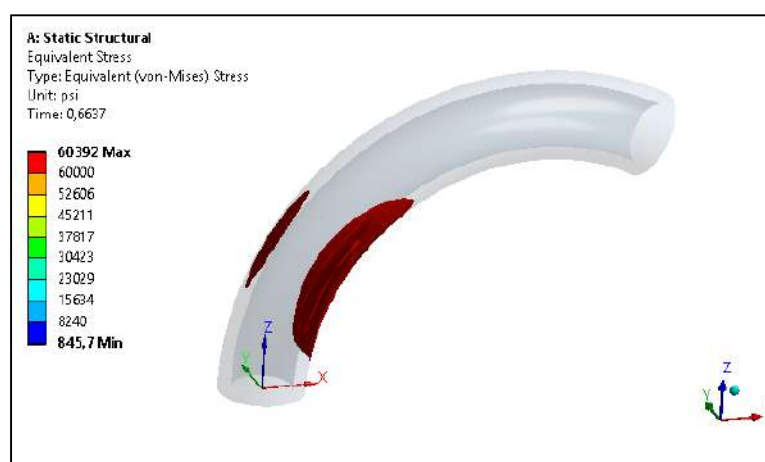


Figura 76 – Região de início do escoamento em vermelho

O carregamento que promoveu o início do escoamento (F_{ra}/F_o) foi de 0,078 com rotação da extremidade livre de $1,57^\circ$.

A distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2%, na Figura 77, mostra que a deformação de 2% ocorreu na região entre o engaste e a região central na superfície externa do intrados. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

O carregamento que promoveu a deformação principal máxima compressiva de 2% (F_{ra}/F_o) foi de 0,092 com rotação da superfície livre foi de 4,51°.

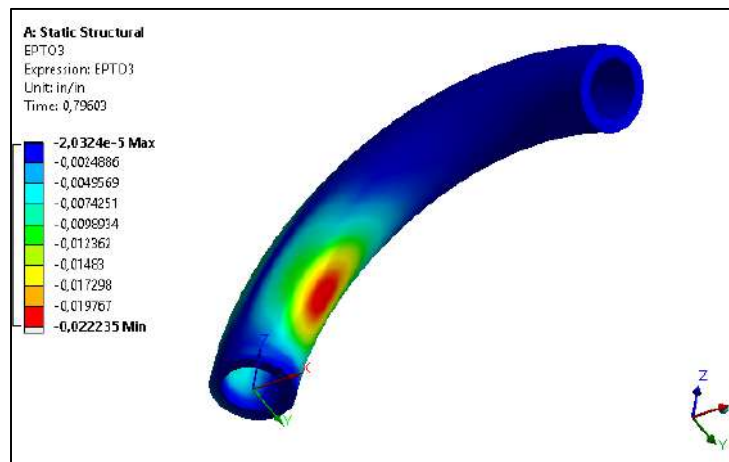


Figura 77 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2%

A deformação plástica equivalente máxima de 10% ocorreu a região entre o engaste e a região central na superfície externa do intrados, conforme Figura 78. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

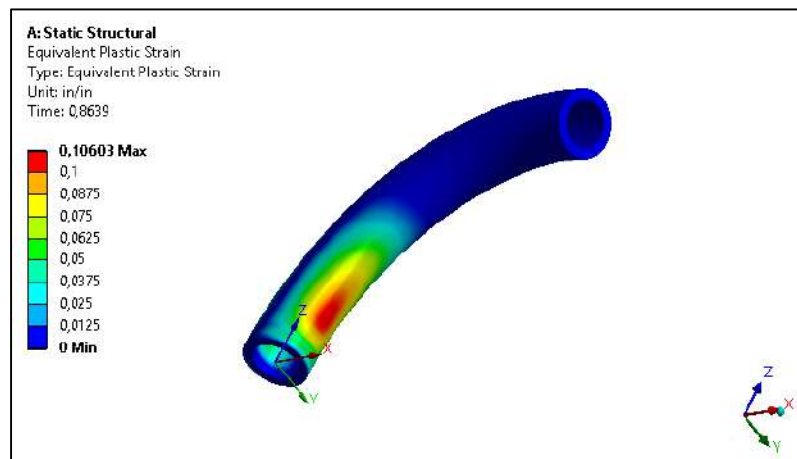


Figura 78 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 10%

O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente de 10% foi (F_{ra}/F_o) de 0,101 com rotação da superfície livre de 20,53°.

A deformação plástica equivalente máxima de 12% ocorreu na região entre o engaste e a região central na superfície externa do intrados, conforme Figura 79. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

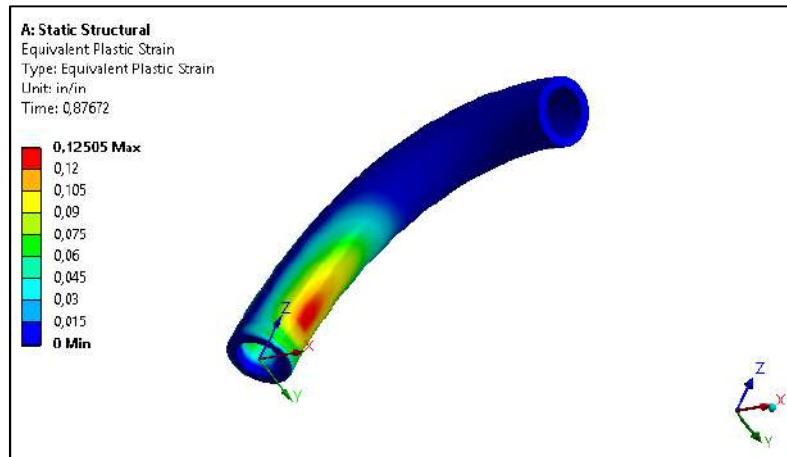


Figura 79 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 12%

O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente máxima de 12% foi (F_{ra}/F_o) 0,103 com rotação da superfície livre de $24,36^\circ$.

A perda da estabilidade estrutural ocorreu conforme mostrada na Figura 80 e com carregamento de (F_{ra}/F_o) de 0,106 com rotação da extremidade livre de $41,57^\circ$ e com deformação plástica equivalente de 27,70%.

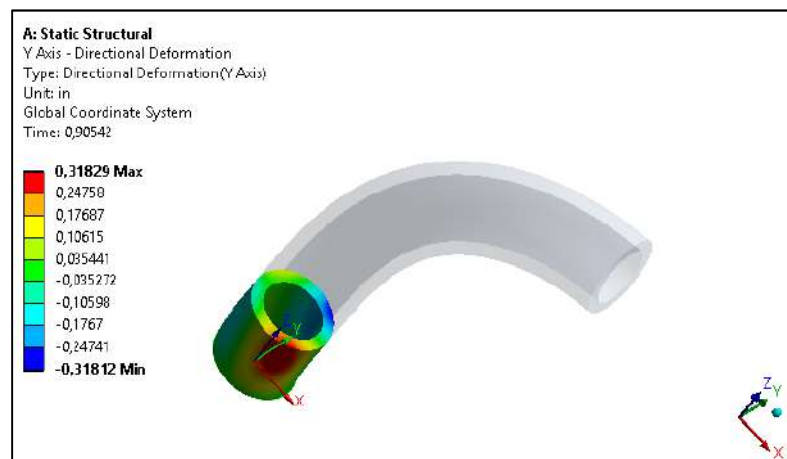


Figura 80 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural

5.2.2.2 Distribuições das deformações na estrutura com raio de curvatura de cinco vezes o diâmetro externo ($R=5D_{ext}$)

5.2.2.2.1 Força normal pura

Com carregamento de força normal pura no plano abrindo a estrutura, o escoamento iniciou na região do engaste, conforme mostrado na Figura 81.

O carregamento que iniciou escoamento (F_{ra}/F_o) foi de 0,030 com rotação da extremidade livre de $1,24^\circ$.

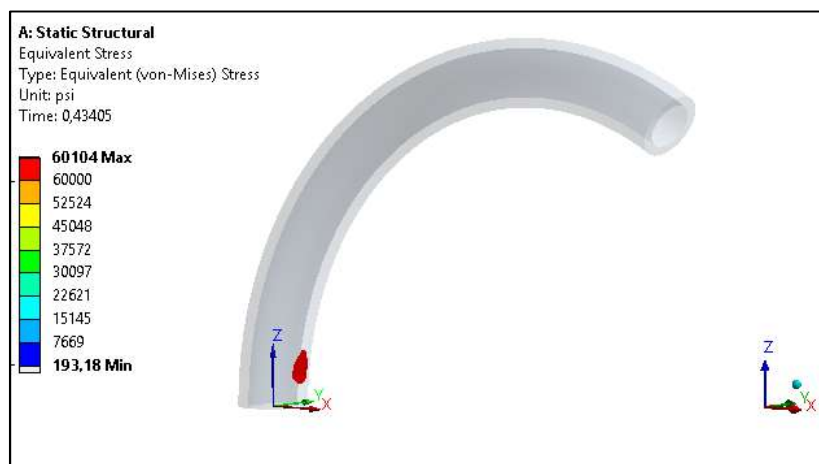


Figura 81 – Região de início do escoamento em vermelho

A distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2%, na Figura 82, mostra que a deformação de 2% ocorreu na região do engaste e na superfície externa do extrados. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

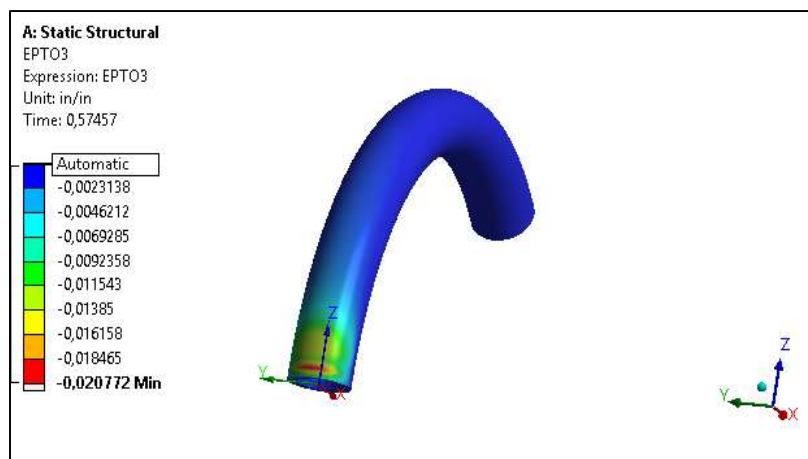


Figura 82 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2%

O carregamento que promoveu a deformação principal máxima compressiva de 2% (F_{ra}/F_o) foi de 0,040 com rotação da superfície livre foi de $3,00^\circ$.

A deformação plástica equivalente máxima de 10% ocorreu na mesma região e superfície da deformação principal máxima compressiva de 2% mostrada na Figura 82. O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente de 10% foi (F_{ra}/F_o) de 0,047 com rotação da superfície livre foi de $13,07^\circ$.

A deformação plástica equivalente máxima de 12% também ocorreu na mesma região e superfície da deformação principal máxima compressiva de 2% mostrada na Figura 82. O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente máxima de 12% foi (F_{ra}/F_o) de 0,048 com rotação da superfície livre foi de $15,71^\circ$.

A perda estabilidade estrutural ocorreu na região próxima ao engaste com carregamento (F_{ra}/F_o) de 0,052 com rotação da extremidade livre de $24,45^\circ$ e com deformação plástica equivalente de 29,91%. A Figura 83 mostra a ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural.

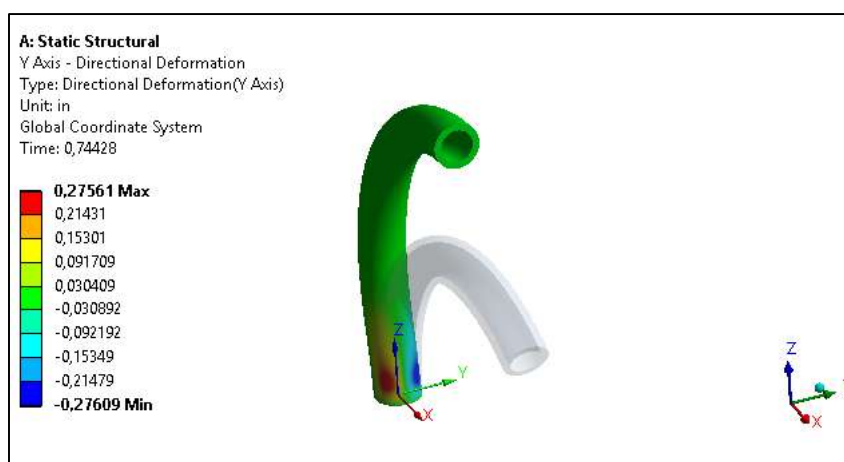


Figura 83 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade estrutural

5.2.2.2 Força cortante pura

Com carregamento de força cortante pura no plano abrindo a estrutura, o escoamento iniciou na região entre o engaste a região central, conforme mostrado na Figura 84.

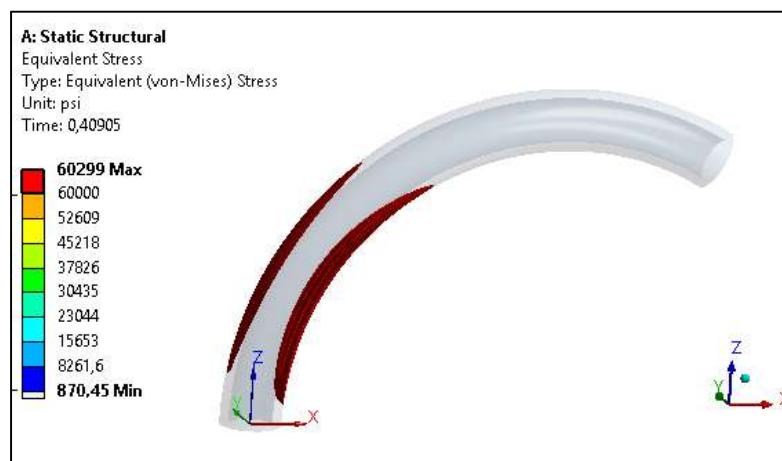


Figura 84 – Região de início do escoamento em vermelho

O carregamento que promoveu o início do escoamento (F_{ra}/F_o) foi de 0,048 com rotação da extremidade livre de $2,57^\circ$.

A distribuição das deformações principais máximas trativas até 2%, na Figura 85, mostra que a deformação de 2% ocorreu na região entre o engaste e a região central

na superfície externa do intrados. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

O carregamento que promoveu a deformação principal máxima compressiva de 2% (F_{ra}/F_o) foi de 0,055 com rotação da superfície livre foi de 6,92°.

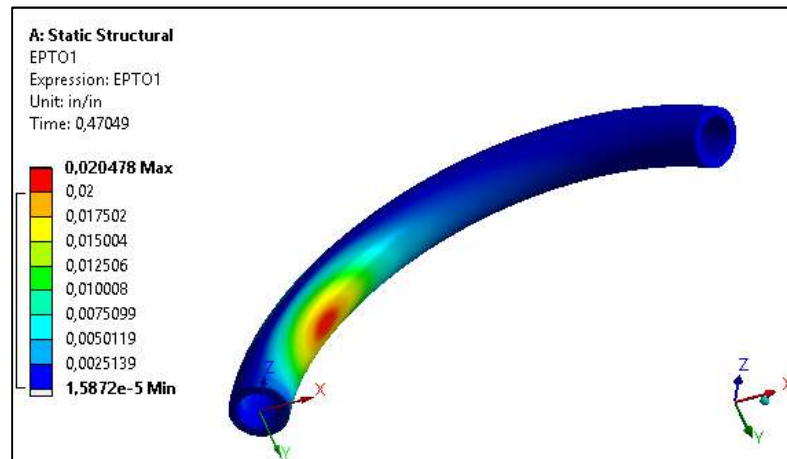


Figura 85 – Distribuição das deformações principais máximas compressivas até 2%

A deformação plástica equivalente máxima de 10% ocorreu a região do engaste na superfície externa do intrados, conforme Figura 86. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

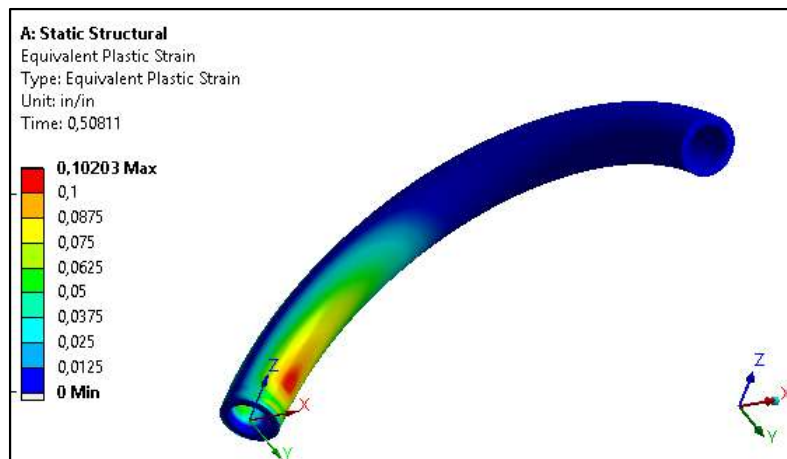


Figura 86 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 10%

O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente de 10% foi (F_{ra}/F_o) de 0,059 com rotação da superfície livre de 32,89°.

A deformação plástica equivalente máxima de 12% ocorreu na região do engaste na superfície externa do intrados, conforme Figura 87. A região do *crown* permaneceu no regime elástico enquanto o restante da parede plastificou.

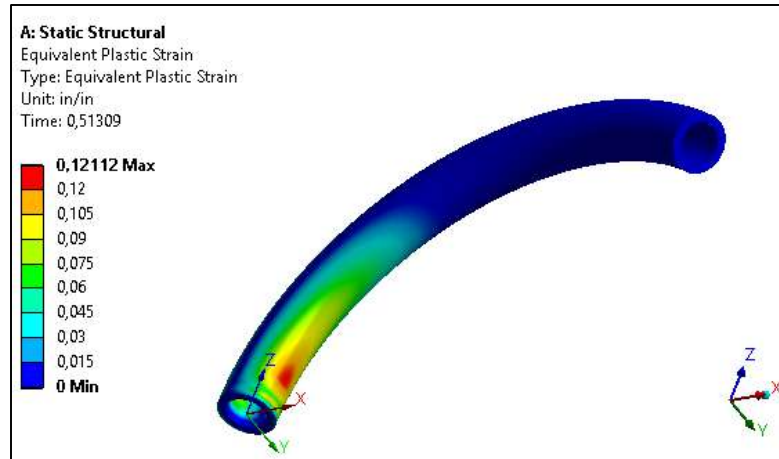


Figura 87 – Distribuição das deformações plásticas equivalente até 12%

O carregamento que promoveu a deformação plástica equivalente máxima de 12% foi (F_{ra}/F_o) 0,060 com rotação da superfície livre de $38,17^\circ$.

A perda da estabilidade estrutural ocorreu conforme mostrada na Figura 88 e com carregamento de (F_{ra}/F_o) de 0,061 com rotação da extremidade livre de $56,48^\circ$ e com deformação plástica equivalente de 22,93%.

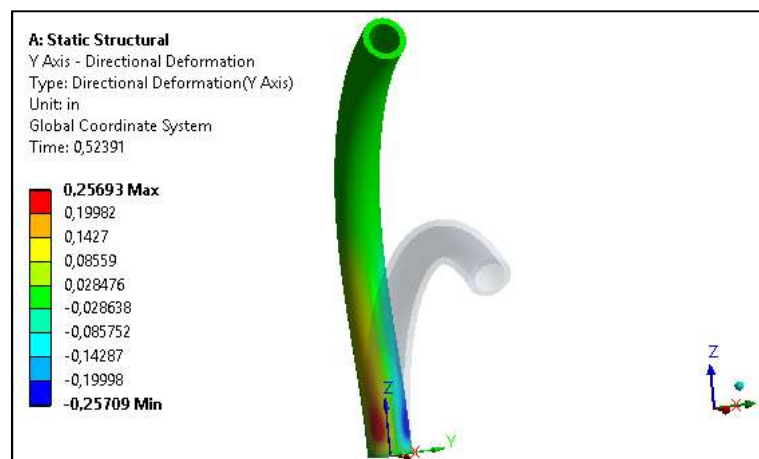


Figura 88 – Ovalização da seção onde ocorreu a perda da estabilidade

As Tabelas 9 e 10 mostram um resumo dos resultados obtidos no estudo das deformações para carregamentos de força normal pura e força cortante pura ambas no plano.

Tabela 9 – Resultados para carregamentos de forças normal e cortante puras no plano

Carregamento fechando a estrutura	Condição	Rotação da extremidade livre (°)		Carregamento aplicado (Fra/Fo)	
		R=3Dext	R=5Dext	R=3Dext	R=5Dext
Força normal pura	Início de escoamento	1,05	1,52	0,061	0,034
	Deformação principal máxima de 2%	2,03	3,67	0,069	0,040
	Deformação plástica equivalente de 10%	8,83	14,50	0,078	0,046
	Deformação plástica equivalente máxima de 12%	10,85	16,61	0,080	0,048
	Limite de estabilidade estrutural	24,92	33,45	0,086	0,050
Força cortante pura	Início de escoamento	1,34	2,31	0,069	0,046
	Deformação principal máxima de 2%	4,09	6,54	0,094	0,057
	Deformação plástica equivalente de 10%	17,43	31,24	0,107	0,069
	Deformação plástica equivalente máxima de 12%	22,65	36,74	0,109	0,071
	Limite de estabilidade estrutural	36,10	57,72	0,115	0,076
Carregamento abrindo a estrutura	Condição	Rotação da extremidade livre (°)		Carregamento aplicado (Fra/Fo)	
		R=3Dext	R=5Dext	R=3Dext	R=5Dext
Força normal pura	Início de escoamento	1,12	1,24	0,063	0,030
	Deformação principal máxima de 2%	2,09	3,00	0,069	0,040
	Deformação plástica equivalente de 10%	8,34	13,07	0,079	0,047
	Deformação plástica equivalente máxima de 12%	9,56	15,71	0,081	0,048
	Limite de estabilidade estrutural	24,45	33,3	0,090	0,052
Força cortante pura	Início de escoamento	1,57	2,57	0,078	0,048
	Deformação principal máxima de 2%	4,51	6,92	0,092	0,055
	Deformação plástica equivalente de 10%	20,53	32,89	0,101	0,059
	Deformação plástica equivalente máxima de 12%	24,36	38,17	0,103	0,060
	Limite de estabilidade estrutural	41,57	56,48	0,106	0,061

Tabela 10 – Deformações plásticas equivalentes na perda da estabilidade para carregamentos de forças normal e cortante puras no plano

Carregamento	R=3Dext	R=5Dext
Força normal pura fechando a estrutura	25,00%	22,90%
Força normal pura abrindo a estrutura	33,62%	29,91%
Força cortante pura fechando a estrutura	23,14%	22,51%
Força cortante pura abrindo a estrutura	27,70%	22,93%

A Figura 89 e a Figura 90 mostram o comportamento da estrutura submetida aos carregamentos de forças normal e cortante puras, nas quais podem ser identificadas as forças que podem ser aplicadas na estrutura sem que haja perda da estabilidade estrutural. No comportamento pós-perda da estabilidade ocorreu o aumento da deformação plástica equivalente com a diminuição dos carregamentos de força normal e cortante puras.

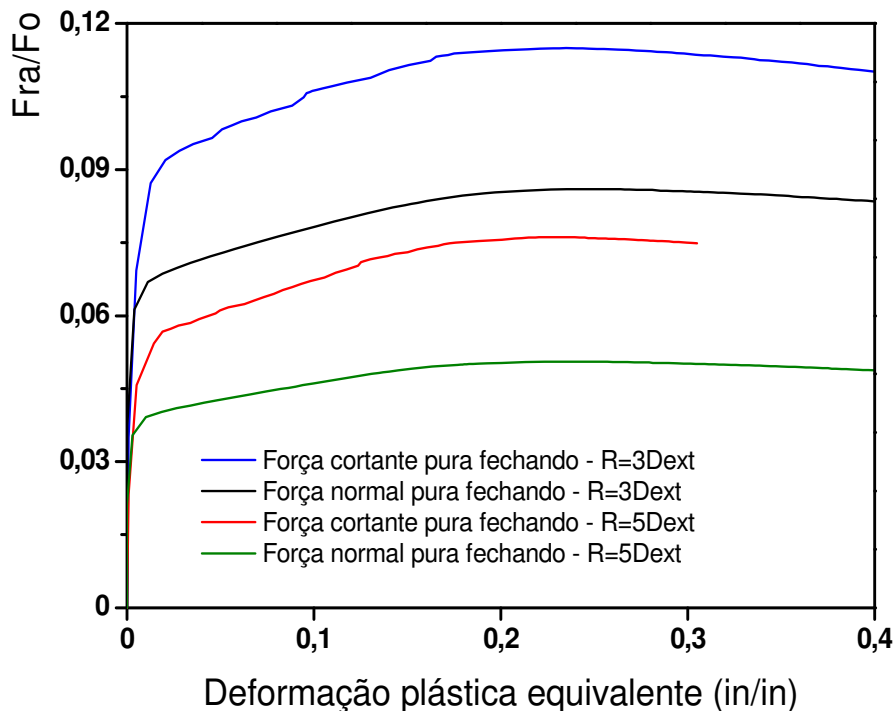


Figura 89 – Curvas de F_{ra}/F_o em relação à deformação plástica equivalente para as forças normal e cortante puras fechando a estrutura para raios de curvatura R=3Dext e R=5Dext, passando pela perda da estabilidade estrutural

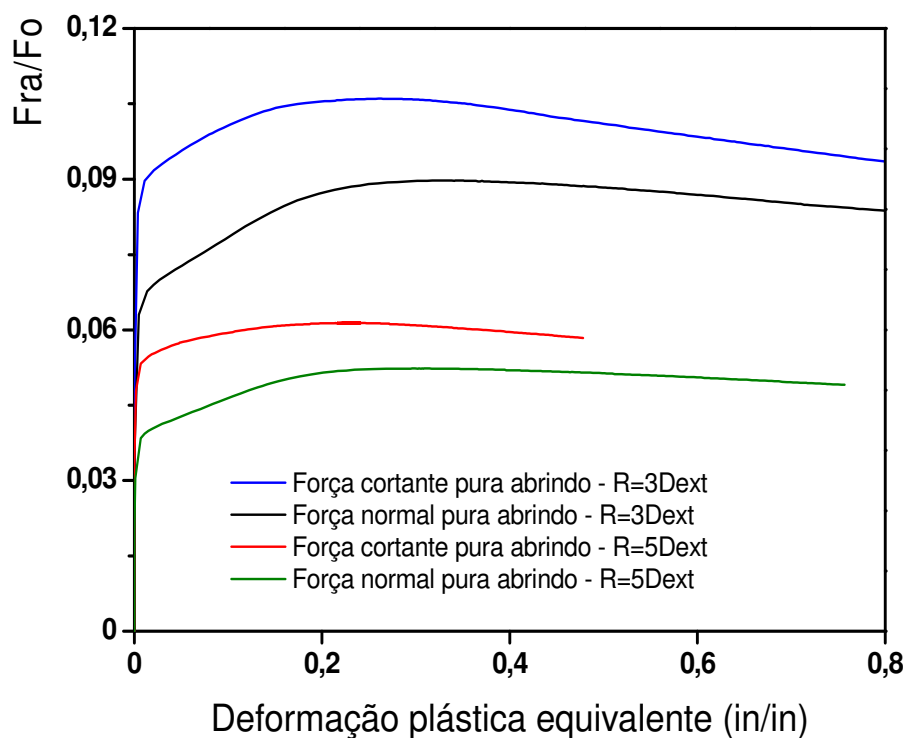


Figura 90 – Curvas de F_{ra}/F_o em relação à deformação plástica equivalente para as forças normal e cortante puras abrindo a estrutura para raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$, passando pela perda da estabilidade estrutural

Com base nos resultados dos carregamentos de forças normal e cortante puras no plano fechando e abrindo a estrutura, concluiu-se:

- As estruturas com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ requerem forças normais e cortantes maiores para atingir as deformações e o limite de estabilidade estrutural do que as estruturas com raio de curvatura $R=5D_{ext}$;
- As estruturas requerem forças cortantes puras no plano maiores do que as forças normais puras no plano para atingir as mesmas deformações e o limite de estabilidade estrutural tanto para o fechamento quanto para a abertura para ambos raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$;
- Ambas estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$ atingiram o limite de estabilidade estrutural quando submetidas aos carregamentos de forças normal e cortante puras no plano tanto abrindo quanto fechando, com deformações plásticas equivalentes maiores do que 12%.

5.3 Carregamentos combinados de momento fletor, força normal e força cortante

Os carregamentos combinados no plano foram aplicados simultaneamente na estrutura, a fim de avaliar o comportamento da estrutura até a perda da estabilidade estrutural, identificar os carregamentos que causassem deformação principal máxima de 2% e a perda da estabilidade estrutural e verificar a influência das forças normal e cortante no comportamento da estrutura submetida somente ao carregamento de momento fletor.

5.3.1 Comportamento da força resultante seguidora e sua reação no engaste conforme a estrutura se deforma

A depender da relação de intensidade entre a força normal e força cortante aplicadas na estrutura, haverá uma força resultante com determinada direção. Conforme a estrutura se deforma, a força resultante, que é seguidora, mantém a sua direção em relação a superfície na qual foi aplicada (extremidade livre da estrutura), entretanto a força resultante é decomposta em duas componentes no seu plano de aplicação.

A seguir são apresentados os comportamentos das componentes das forças resultantes para algumas direções no fechamento e na abertura da estrutura.

a) Na Figura 91 é apresentado o comportamento da força resultante fechando a estrutura com $\varphi = -30$ (normal pura)

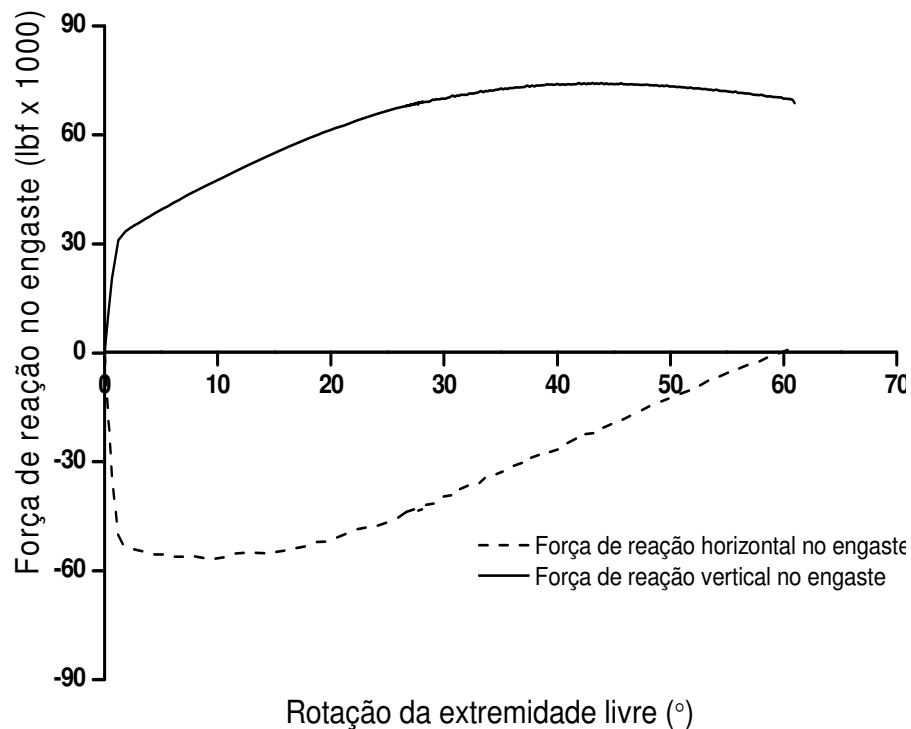


Figura 91 – Comportamento da força resultante aplicada e suas componentes - força normal pura ($\varphi = -30^\circ$)

Observa-se que para o fechamento da estrutura, a força de reação horizontal no engaste muda sua direção quando a extremidade livre da estrutura rotaciona mais de 60° , que é o ângulo de saída. Isto ocorre para ângulos de direção da força resultante (φ) maiores que -90° .

b) Na Figura 92 é apresentado o comportamento da força resultante fechando a estrutura com $\varphi = -120^\circ$ (cortante pura)

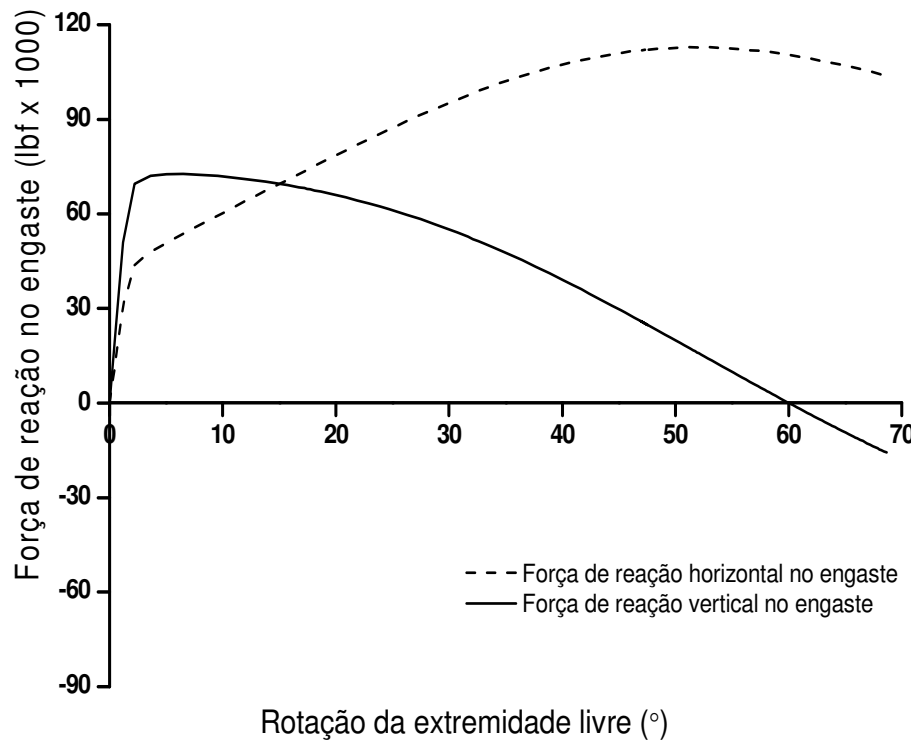


Figura 92 – Comportamento da força resultante aplicada e suas componentes - força cortante pura ($\varphi = -120^\circ$)

c) Na Figura 93 é apresentado o comportamento da força resultante abrindo a estrutura com $\varphi=60^\circ$ (cortante pura)

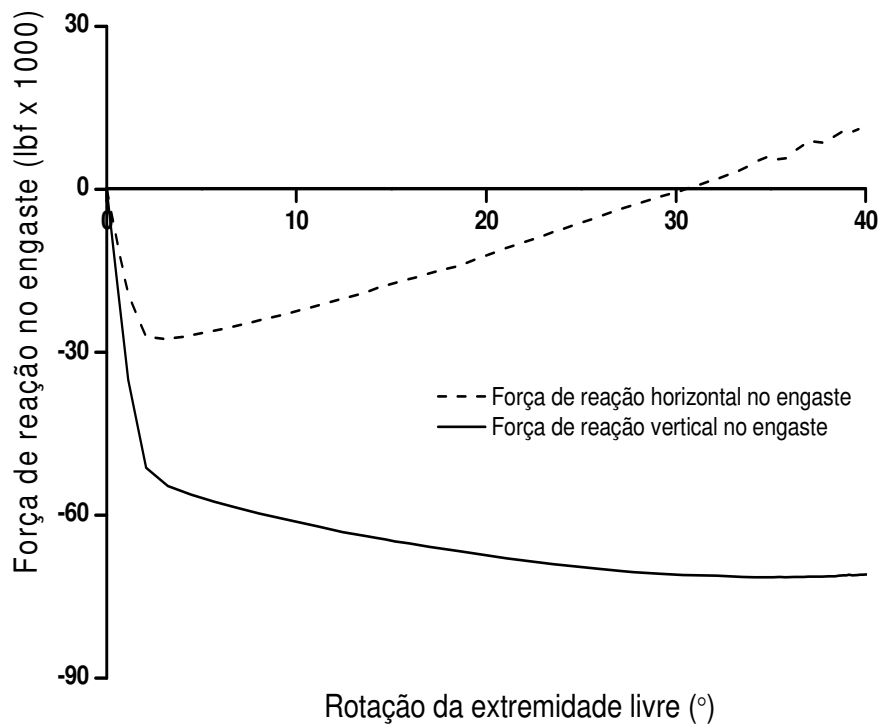


Figura 93 – Comportamento da força resultante aplicada e suas componentes - força cortante pura ($\varphi = 60^\circ$)

Observa-se que para a abertura da estrutura, a força de reação horizontal no engaste muda sua direção quando a extremidade livre da estrutura rotaciona mais de 30° , que é o complemento do ângulo de saída. Isto ocorre para ângulos de direção da força resultante (φ) menores que 90° .

d) Na Figura 94 é apresentado o comportamento da força resultante abrindo a estrutura com $\varphi=150^\circ$ (normal pura)

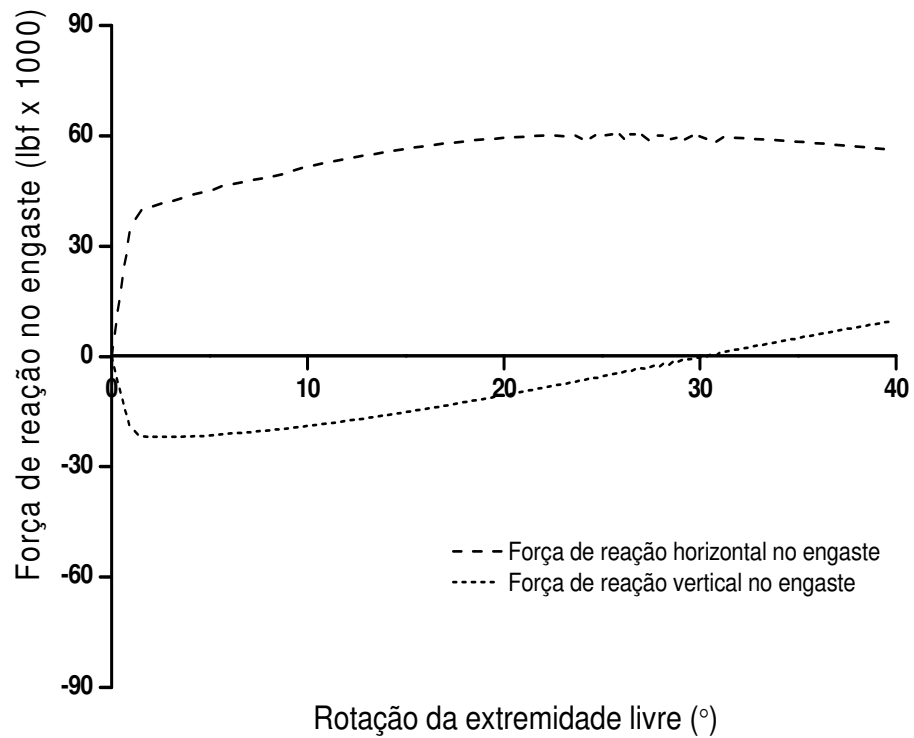


Figura 94 – Comportamento da força resultante aplicada e suas componentes - força normal pura ($\varphi=150^\circ$)

5.3.2 Carregamentos combinados fechando a estrutura

Os gráficos abaixo mostram a influência das forças normal e cortante no momento fletor, ou seja, a redução da capacidade da estrutura suportar o carregamento de momento fletor quando combinado com as forças normal e cortante e vice-versa.

5.3.2.1 Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação principal máxima de 2%

5.3.2.1.1 Estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$

A Figura 95 mostra que o momento fletor que causa a deformação máxima principal de 2% é reduzido conforme a força resultante aumenta para todas as combinações de carregamentos.

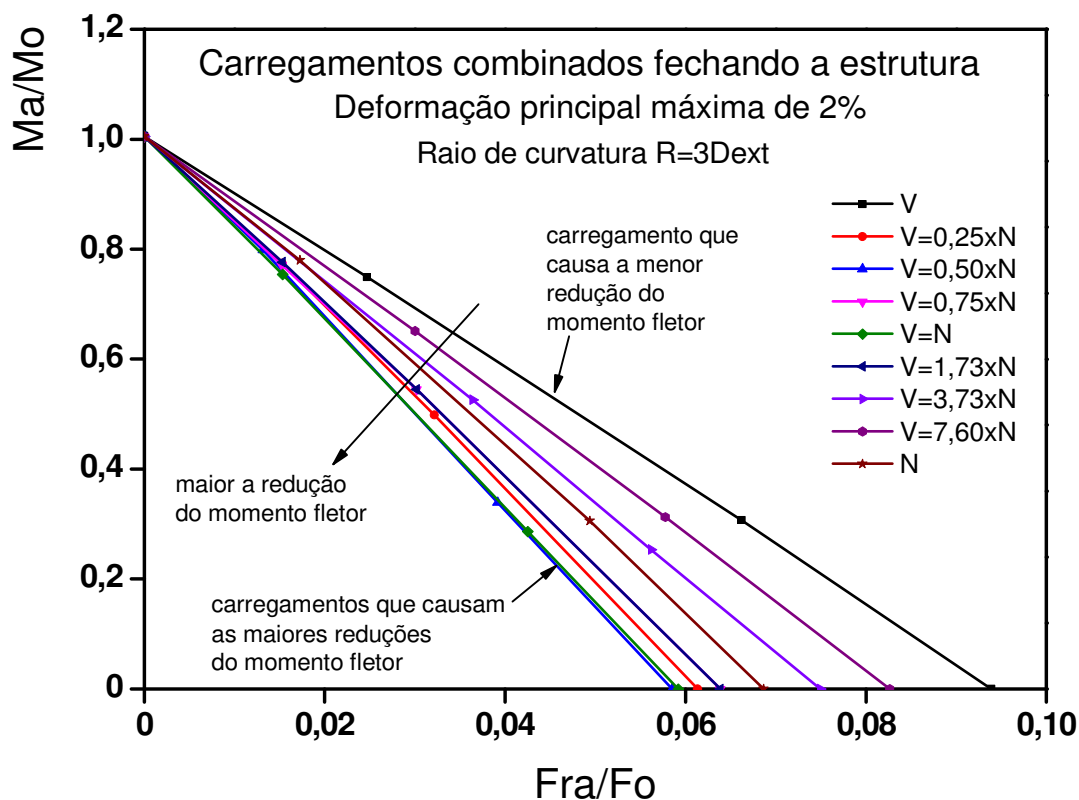


Figura 95 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para deformação principal máxima de 2% para estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$

A menor redução do momento fletor ocorreu quando combinado somente com a força cortante e as maiores reduções ocorreram para $V=0,50 \times N$ e $V=N$.

A redução do momento fletor quando combinado com as forças normal e cortante, ambas de mesma intensidade ($V=N$), foi maior do que quando combinado somente com força normal ou somente com força cortante.

As combinações cuja intensidade da força cortante foi menor do que da força normal provocaram maiores reduções do momento do que para as combinações cuja intensidade da força cortante foi maior do que da força normal.

5.3.2.1.2 Estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$

A Figura 96 mostra que o momento fletor que causa a deformação máxima principal de 2% é reduzido conforme a força resultante aumenta para todas as combinações de carregamentos.

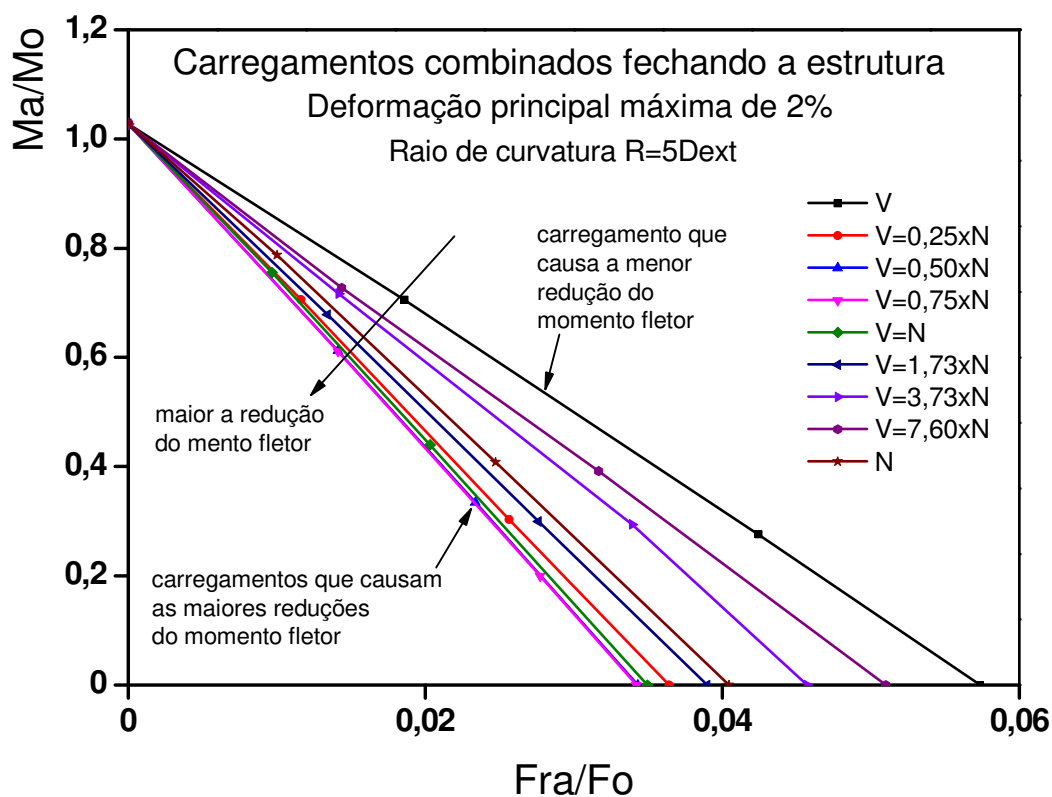


Figura 96 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para deformação principal máxima de 2% para estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$

A menor redução do momento fletor ocorreu quando combinado somente com a força cortante e as maiores reduções ocorreram para $V=0,50 \times N$ e $V=0,75 \times N$.

A redução do momento fletor quando combinado com as forças normal e cortante, ambas de mesma intensidade ($V=N$), foi maior do que quando combinado somente com força normal ou somente com força cortante.

As combinações cuja intensidade da força cortante foi menor do que da força normal provocaram maiores reduções do momento do que para as combinações cuja intensidade da força cortante foi maior do que da força normal.

5.3.2.2 Influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade

5.3.2.2.1 Estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$

A Figura 97 mostra que o momento fletor limite de estabilidade é reduzido conforme a força resultante aumenta.

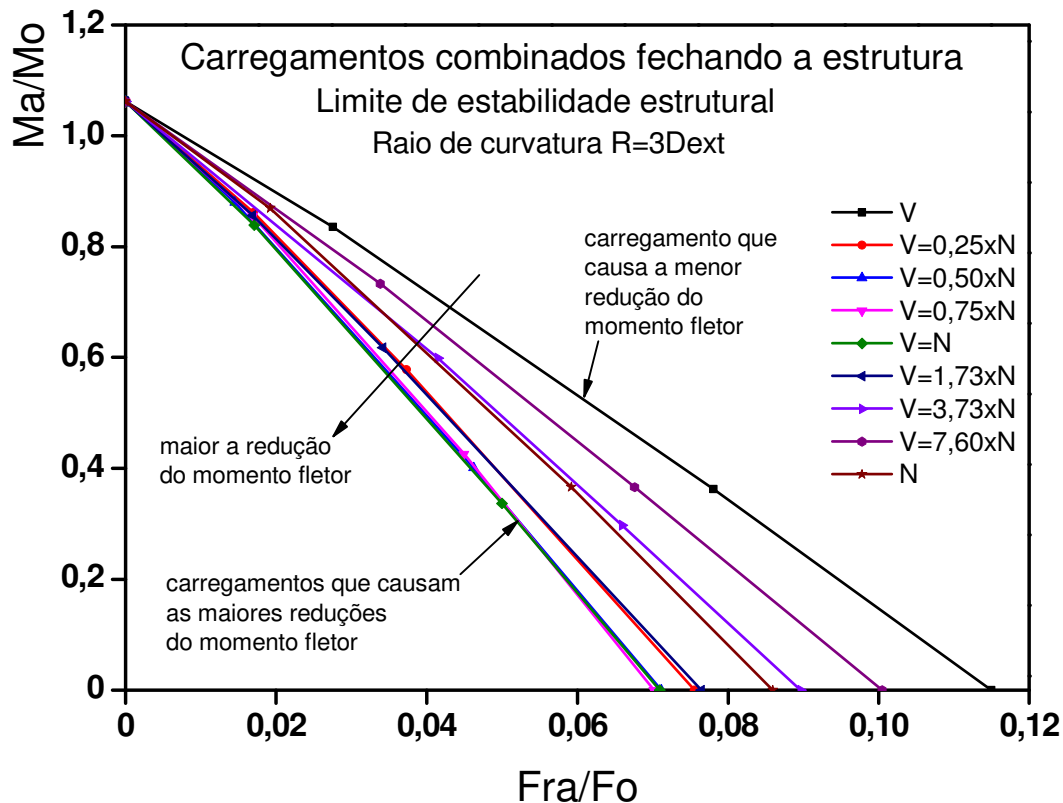


Figura 97 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade estrutural para estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$

A menor redução do momento fletor ocorreu quando combinado somente com a força cortante e as maiores reduções ocorreram para $V=0,50xN$, $V=0,75xN$ e $V=N$.

A redução do momento fletor quando combinado com as forças normal e cortante, ambas de mesma intensidade ($V=N$), foi maior do que quando combinado somente com força normal ou somente com força cortante.

As combinações cuja intensidade da força cortante foi menor do que da força normal provocaram maiores reduções do momento do que para as combinações cuja intensidade da força cortante foi maior do que da força normal.

5.3.2.2.2 Estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$

Figura 98A Figura 98 mostra que o momento fletor limite de estabilidade é reduzido conforme a força resultante aumenta.

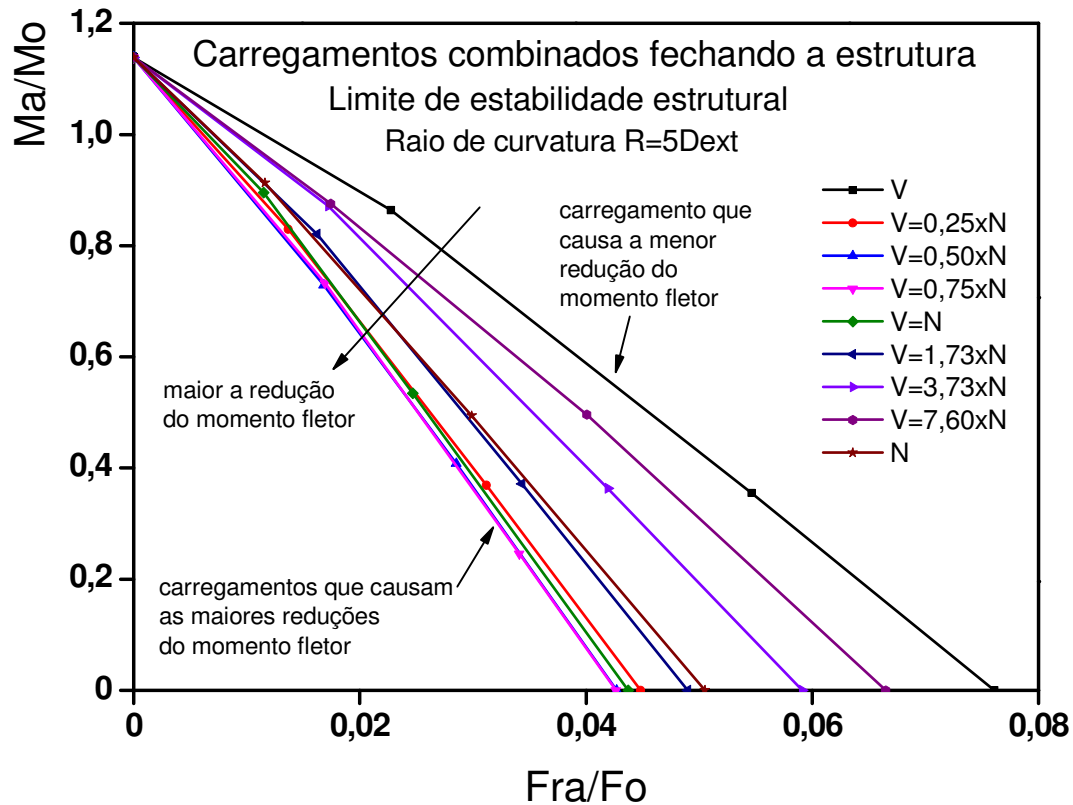


Figura 98 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade estrutural para estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$

A menor redução do momento fletor ocorreu quando combinado somente com a força cortante e as maiores reduções ocorreram para $V=0,50 \times N$ e $V=0,75 \times N$.

A redução do momento fletor quando combinado com as forças normal e cortante, ambas de mesma intensidade ($V=N$), foi maior do que quando combinado somente com força normal ou somente com força cortante.

As combinações cuja intensidade da força cortante foi menor do que da força normal provocaram maiores reduções no momento do que para as combinações cuja intensidade da força cortante foi maior do que da força normal.

5.3.2.2.3 Resumo dos resultados da influência das forças normal e cortante no momento fletor para estruturas com raio de curvatura $R=3D_{ext}$

- a) O momento fletor que causa deformação principal máxima de 2% e o momento fletor limite de estabilidade estrutural são reduzidos quando combinados com as forças normal e cortante, conforme o aumento da força resultante;
- b) A menor redução para ambos momentos fletores ocorreu quando combinado somente com força cortante;
- c) As combinações das forças normal e cortante $V=0,50xN$, $V=0,75xN$ e $V=N$ provocaram as maiores reduções do momento fletor que causa a deformação principal máxima de 2%, enquanto que para o momento fletor limite de estabilidade as maiores reduções foram causadas pelas combinações $V=0,50xN$, $V=0,75xN$;
- d) A redução de ambos momentos fletores quando combinados com as forças normal e cortante, ambas de mesma intensidade ($V=N$), foi maior do que quando combinado somente com força normal ou somente com força cortante;
- e) Para ambos momentos as combinações, cuja intensidade da força cortante foi menor do que da força normal, provocaram maiores reduções do momento do que para as combinações cuja intensidade da força cortante foi maior do que da força normal.

Os resultados mostraram que a adoção do critério de falha de deformação principal máxima de 2%, para carregamentos combinados, fechando a estrutura para ambos raios de curvatura, evita que a estrutura seja submetida a carregamentos combinados que possam provocar a perda da estabilidade estrutural.

A Figura 99 mostra, para a relação entre a força normal e a cortante que produziu a maior redução do momento fletor ($V=0,50xN$), a distância entre as curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação principal máxima de 2% e no momento limite de estabilidade, para as estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$. O mesmo comportamento foi observado para estruturas com raio de curvatura $R=5D_{ext}$.

Os resultados também mostraram que quanto maior foi o momento fletor maior foi a rotação da extremidade livre da estrutura submetida a carregamentos combinados.

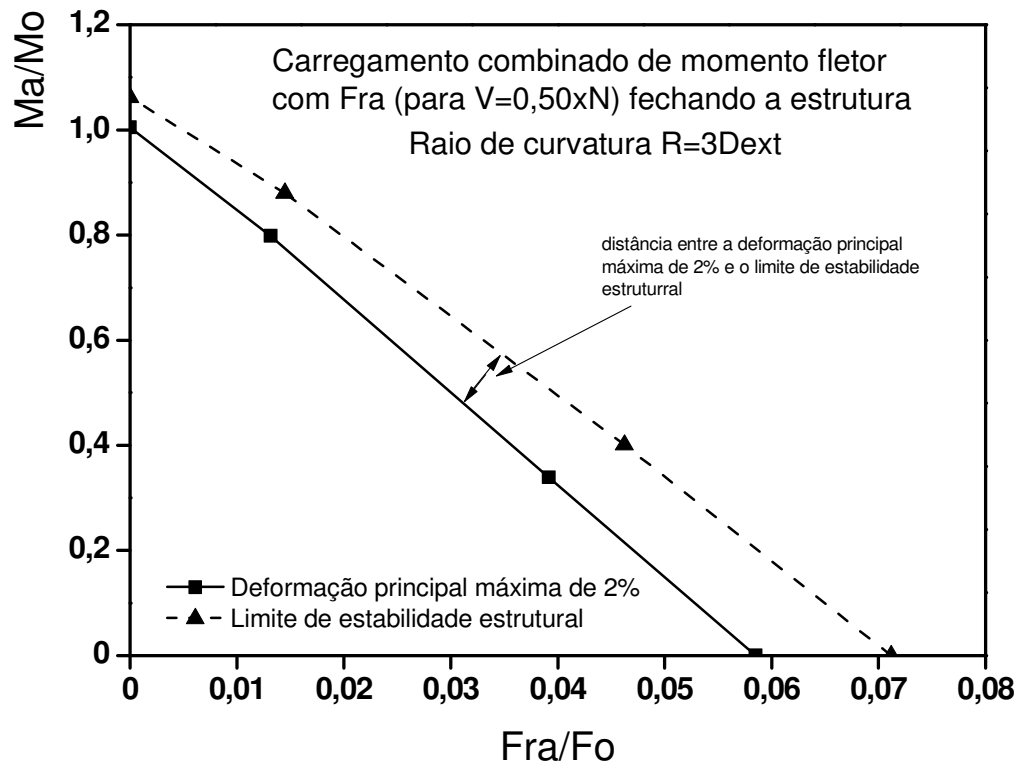


Figura 99 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para $V=0,50 \times N$ para fechamento da estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$.

5.3.3 Carregamentos combinados abrindo a estrutura

Os gráficos abaixo mostram a influência das forças normal e cortante no momento fletor, ou seja, a redução da capacidade da estrutura suportar o carregamento de momento fletor quando combinado com as forças e vice-versa.

5.3.3.1 Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação principal máxima de 2%

5.3.3.1.1 Estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$

A Figura 100 mostra que o momento fletor que causa a deformação máxima principal de 2% é reduzido conforme a força resultante aumenta para todas as combinações de carregamentos.

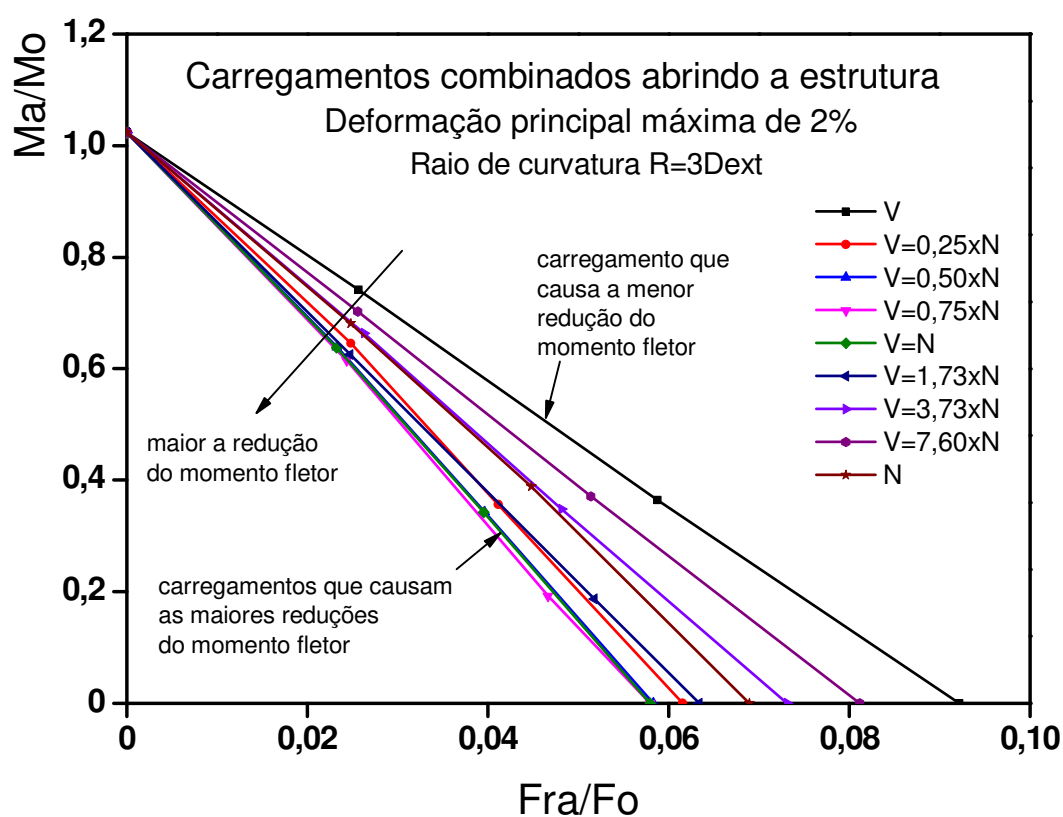


Figura 100 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para deformação principal máxima de 2% para estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$

A menor redução do momento fletor ocorreu quando combinado somente com a força cortante e as maiores reduções ocorreram para $V=0,50 \times N$, $V=0,75 \times N$ e $V=N$.

A redução do momento fletor quando combinado com as forças normal e cortante, ambas de mesma intensidade ($V=N$), foi maior do que quando combinado somente com força normal ou somente com força cortante.

As combinações cuja intensidade da força cortante foi menor do que da força normal provocaram maiores reduções do momento do que para as combinações cuja intensidade da força cortante foi maior do que da força normal.

5.3.3.1.2 Estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$

A Figura 101 mostra que o momento fletor que causa a deformação máxima principal de 2% é reduzido conforme a força resultante aumenta.

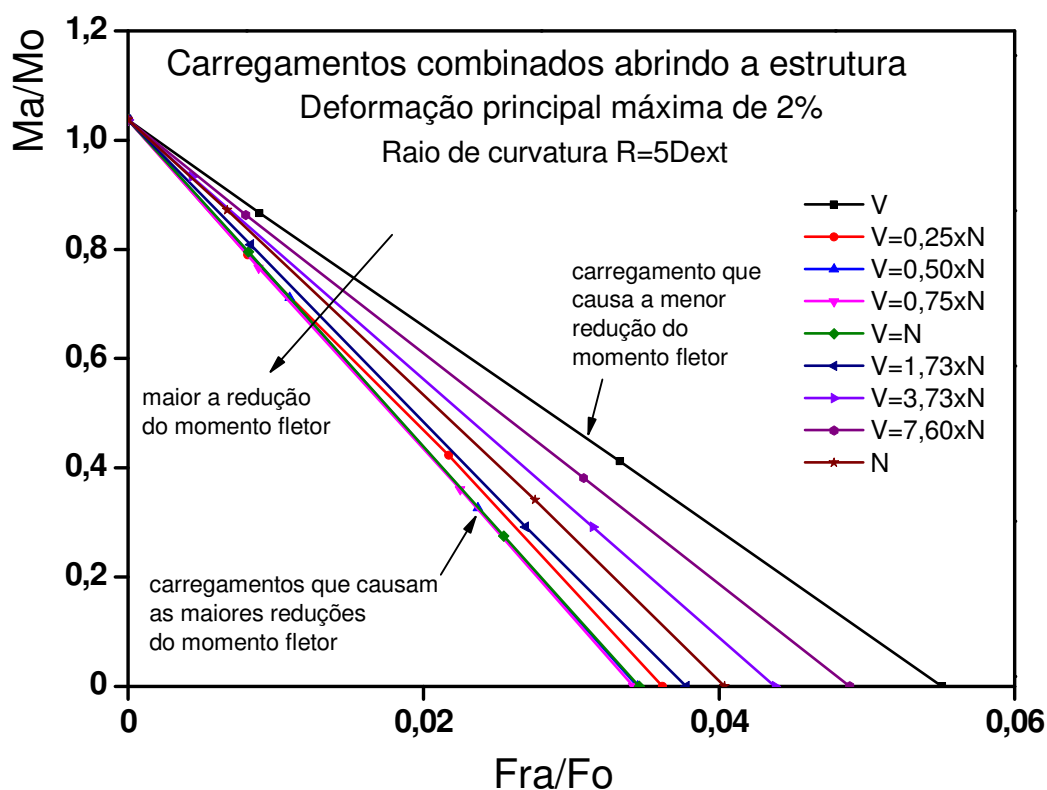


Figura 101 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para deformação principal máxima de 2% para estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$

A menor redução do momento fletor ocorreu quando combinado somente com a força cortante e as maiores reduções ocorreram para $V=0,50 \times N$, $V=0,75 \times N$ e $V=N$.

A redução do momento fletor quando combinado com as forças normal e cortante, ambas de mesma intensidade ($V=N$), foi maior do que quando combinado somente com força normal ou somente com força cortante, para ambos raios de curvatura.

As combinações cuja intensidade da força cortante foi menor do que da força normal provocaram maiores reduções do momento do que para as combinações cuja intensidade da força cortante foi maior do que da força normal.

A Figura 102 mostra, para a relação entre a força normal e a cortante que produziu a maior redução do momento fletor ($V=0,50 \times N$), a distância entre as curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação principal máxima de 2% e no momento limite de estabilidade, para as estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$. O mesmo comportamento foi observado para estruturas com raio de curvatura $R=5D_{ext}$.

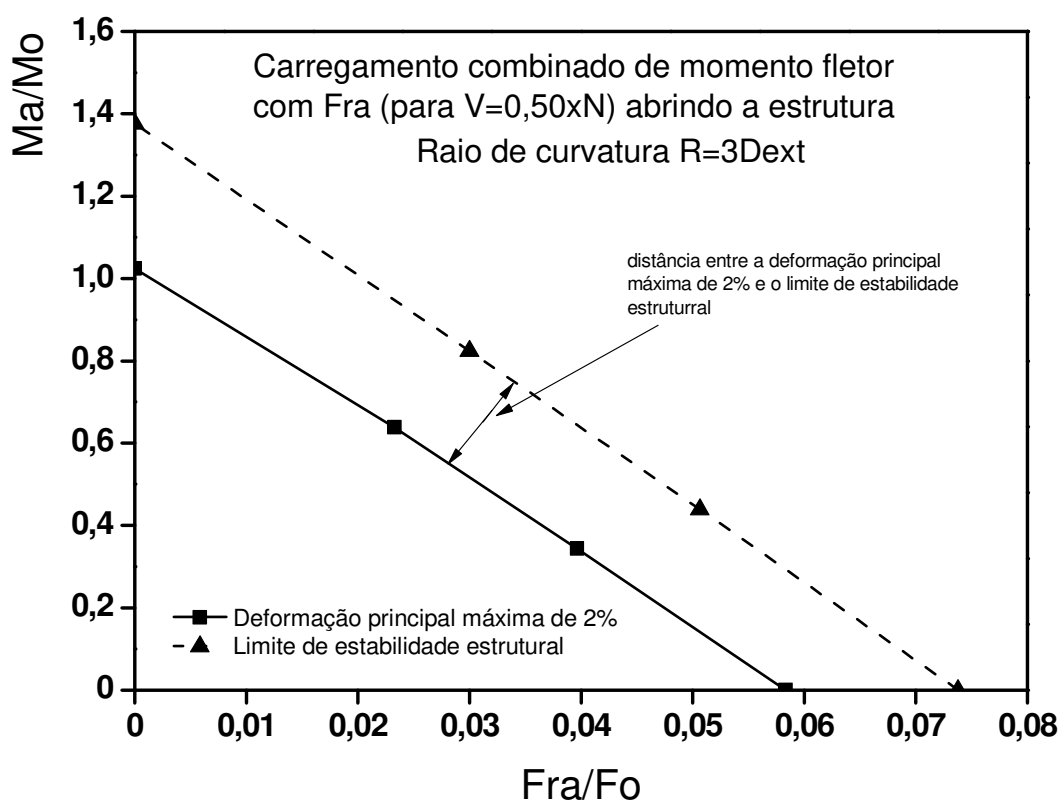


Figura 102 – Curvas de influência das forças normal e cortante no momento fletor para $V=0,50 \times N$ para abertura da estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$.

Os resultados também mostraram que quanto maior foi o momento fletor maior foi a rotação da extremidade livre da estrutura submetida a carregamentos combinados.

5.3.3.2 Influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade

Os resultados dos estudos mostraram que o critério de falha de deformação principal máxima de 2% é suficiente para evitar que as estruturas percam a estabilidade estrutural, quando submetida a carregamentos puros ou combinados no plano abrindo a estrutura, pois os carregamentos necessários para provocarem a perda da estabilidade estrutural são superiores aos necessários para causar deformação principal máxima de 2%.

Além disso, os estudos mostraram também que para que ocorra a perda da estabilidade estrutural sob carregamentos abrindo a estrutura, é necessário que o carregamento retifique a estrutura para então promover a perda da estabilidade estrutural, o que é muito improvável ocorrer em uma condição real para uma estrutura cilíndrica curva de parede espessa de material aço.

5.4 Efeito do histórico de carregamento

A fim de verificar o efeito do histórico de carregamento e comparar com carregamentos aplicados simultaneamente, foram realizadas análises cujos carregamentos de momento fletor e forças combinados não foram aplicados simultaneamente.

Os históricos de carregamentos foram analisados para a estrutura com diâmetro interno de 6", espessura de parede de 1,25" e raio de curvatura três vezes o diâmetro externo, combinando os carregamentos de momento fletor e forças normal e cortante, fechando a estrutura e considerando o critério de falha de deformação principal máxima de 2%.

Os seguintes históricos de carregamentos foram analisados:

- a) (Ma + Fra) - aplicação primeiramente de momento fletor e depois, mantendo o momento constante, aplicação da força resultante, cujos valores de cada carregamento independente não causasse deformação principal maior do que 2%;
- b) (Fra + Ma) - aplicação primeiramente da força resultante e depois, mantendo a força resultante constante, aplicação do momento fletor, cujos valores de cada carregamento independente não causasse deformação principal maior do que 2%.

Os resultados mostraram que, tanto para a aplicação de carregamentos combinados simultâneos ou com histórico de carregamento (Fra + Ma) e (Ma + Fra), os carregamentos combinados limites que causaram deformação principal máxima de 2% foram os mesmos.

6 Estudo paramétrico

O estudo paramétrico avaliou os mecanismos de deformações das estruturas cilíndricas para as geometrias especificadas na Tabela 11, quando submetidas aos carregamentos no plano, tanto fechando quanto abrindo a estrutura, puros ou combinados.

Tabela 11 – Geometrias utilizadas no estudo paramétrico

Dint (in)	t (in)	Dext (in)	R (in)	λ
6	0,75	7,50	3Dext	1,48
	1,00	8,00		1,96
	1,25	8,50		2,43
4	0,75	5,50		2,19
	1,00	6,00		2,88
	1,25	6,50		3,54
	1,50	7,00		4,17
6	0,75	7,50	5Dext	2,47
	1,00	8,00		3,27
	1,25	8,50		4,04
4	0,75	5,50		3,66
	1,00	6,00		4,80
	1,25	6,50		5,90
	1,50	7,00		6,94

Legenda:

Dint – diâmetro interno

t – espessura de parede

Dext – diâmetro externo

R – raio de curvatura

Para o estudo paramétrico buscou-se identificar uma variável não dimensional que pudesse ser relacionada com a geometria da estrutura. Com base na revisão bibliográfica da seção 2 e em análises realizadas para identificar essa variável, o fator geométrico λ foi selecionado como parâmetro do estudo paramétrico. Esse fator geométrico é obtido da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{R.t}{rm^2} = \frac{\frac{R}{rm}}{\frac{rm}{t}} \quad \text{onde, pode ser observado que no cálculo do fator}$$

estão considerados o raio de curvatura da estrutura (R), o raio médio (rm) e a espessura de parede (t).

Assim sendo, os estudos paramétricos são apresentados adiante com base no fator geométrico λ .

A seguir são mostrados os resultados do estudo paramétrico com base nos critérios de falha de deformação principal máxima de 2% e de limite de estabilidade estrutural.

6.1 Carregamento de momento fletor puro

6.1.1 Fechando a estrutura

Os gráficos abaixo mostram os momentos fletores puros no plano máximos que as estruturas foram capazes de suportar segundo os critérios de falha: deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural.

Como pode ser observado na Figura 103, o critério de falha de deformação principal máxima de 2% deve ser aplicado em conjunto com o critério de perda da estabilidade para estruturas cujo $1,48 \leq \lambda \leq 1,96$. Pois para $\lambda=1,48$ a perda da estabilidade estrutural ocorreu com menos de 2% de deformação principal máxima. A partir de $\lambda > 1,96$ pode-se verificar que a perda da estabilidade estrutural ocorreu com mais de 2% de deformação principal máxima.

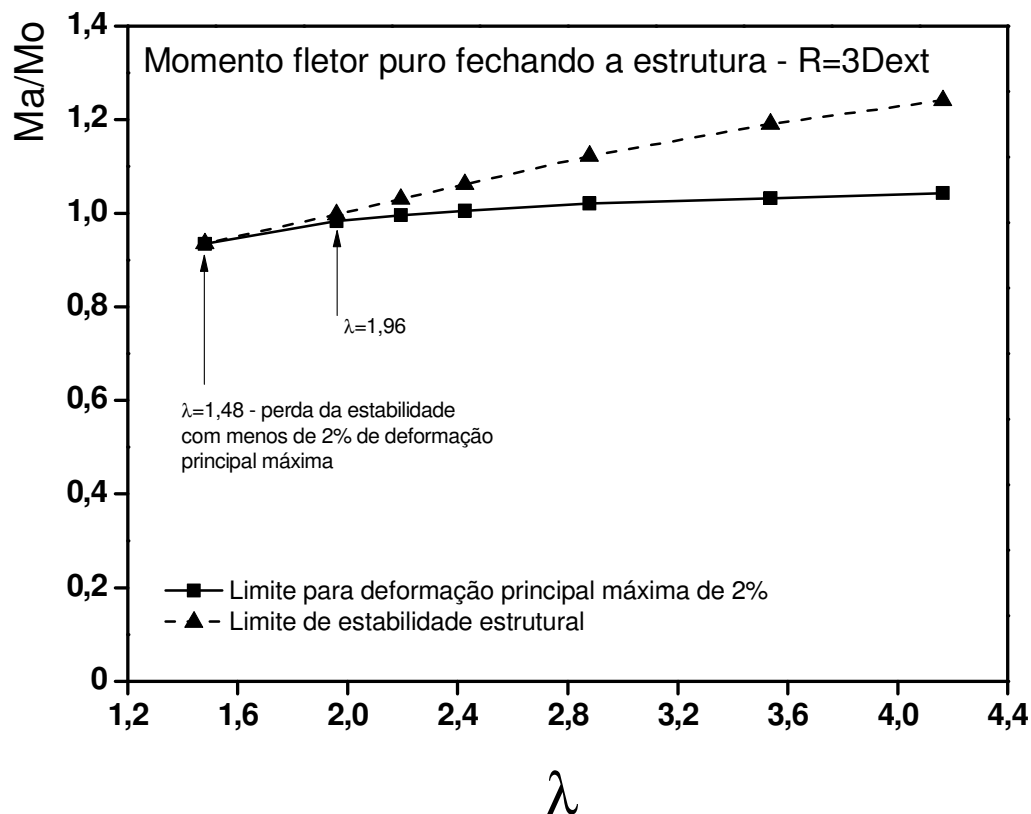


Figura 103 – Carregamento máximo de momento fletor puro no plano fechando a estrutura com raio de curvatura $R=3D_{ext}$, em função de λ , o qual a estrutura é capaz de suportar segundo critério de falha de deformação principal máxima de 2% e o limite de estabilidade estrutural

Como pode ser observado na Figura 104, as estruturas com raio de curvatura $R=5D_{ext}$ submetidas ao carregamento de momento fletor puro no plano não estão sujeitas a perda de estabilidade estrutural para toda a faixa $2,47 \leq \lambda \leq 6,94$, pois o momento fletor limite de estabilidade estrutural é superior ao momento que causa deformação principal máxima de 2%.

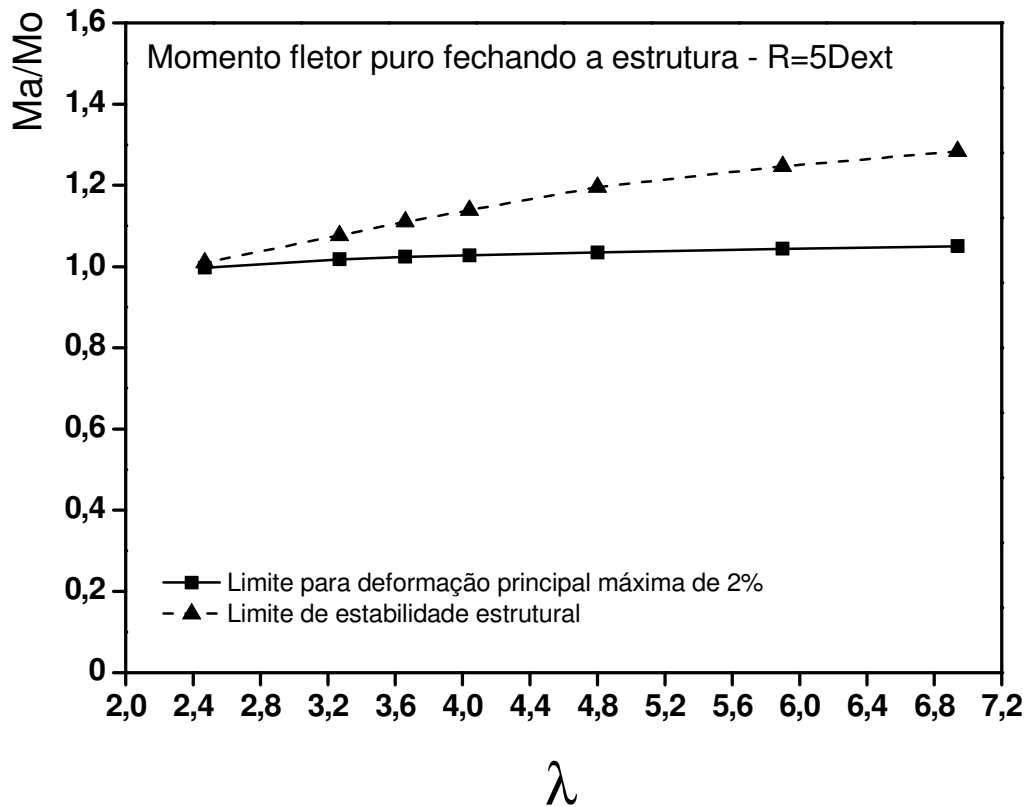


Figura 104 – Carregamento máximo de momento fletor puro no plano fechando a estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$, em função de λ , o qual a estrutura é capaz de suportar segundo critério de falha de deformação principal máxima de 2% e o limite de estabilidade estrutural

6.1.2 Abrindo a estrutura

Ambas estruturas com raios de curvatura $R=3Dext$ e $R=5Dext$ quando submetidas ao carregamento de momento fletor puro abrindo sofreram deformação principal máxima de 2% sem perda da estabilidade estrutural para toda a faixa de λ , ou seja, o momento limite de estabilidade foi superior ao momento que causou deformação principal máxima de 2%.

A Figura 105 mostra os momentos limite de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade para as estruturas com raios de curvatura $R=3Dext$ e $R=5Dext$.

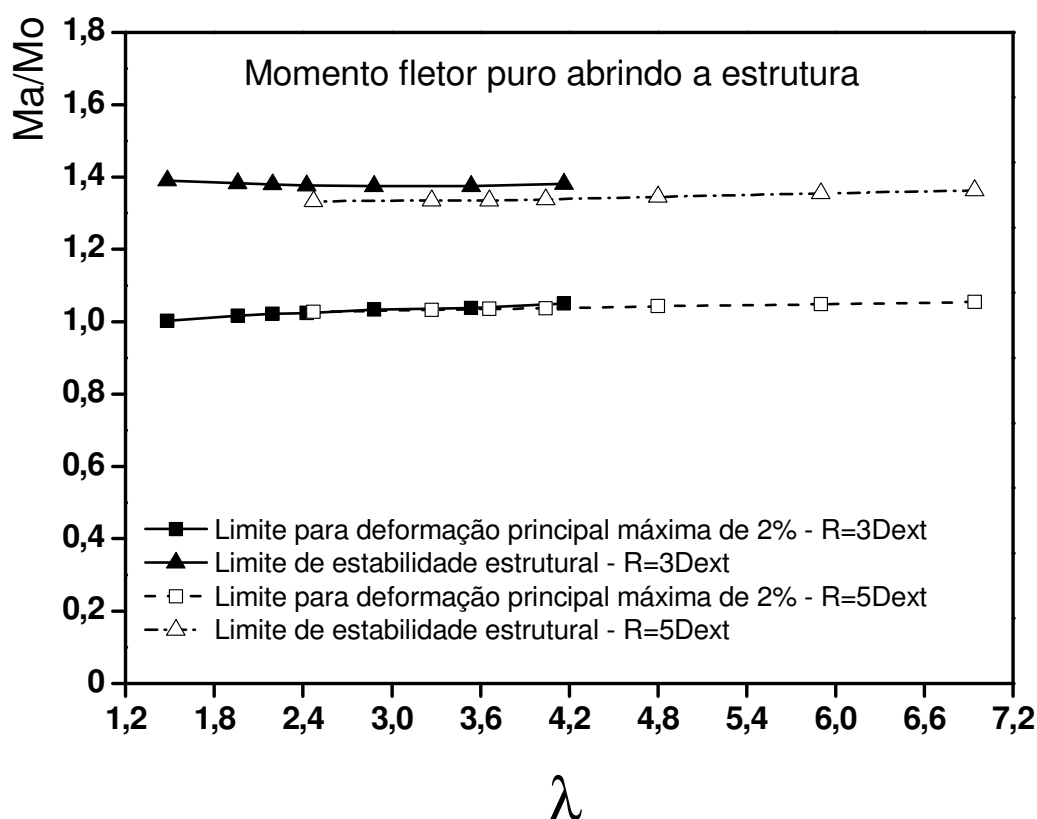


Figura 105 - Carregamentos máximos de momentos fletores puros no plano abrindo as estruturas com raios de curvatura $R=3Dext$ e $R=5Dext$, em função de λ , os quais as estruturas são capazes de suportar segundo os critérios de falha de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural

6.1.3 Resumo do estudo paramétrico de carregamento de momento fletor puro no plano abrindo e fechando as estruturas

Os estudos paramétricos de carregamento de momento fletor puro no plano abrindo ou fechando as estruturas mostraram que:

- a) Estruturas com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ sob carregamento de momento fletor puro no plano fechando são sujeitas a perda da estabilidade estrutural para $1,48 \leq \lambda \leq 1,96$ para deformações principais máximas menores ou pouco acima de 2%, o que requer a aplicação do critério de falha de perda da estabilidade estrutural juntamente ao critério de falha de deformação principal máxima de 2%. Enquanto que para $\lambda > 1,96$, a adoção do critério de deformação principal máxima de 2% é capaz de evitar a perda da estabilidade estrutural;
- b) Estruturas com raio de curvatura $R=5D_{ext}$ sob carregamento de momento fletor puro no plano fechando não sofreram perda de estabilidade estrutural para toda a faixa de λ , ou seja, $2,47 \leq \lambda \leq 6,94$;
- c) Ambas estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$ não sofreram perda de estabilidade estrutural quando submetidas ao carregamento de momento fletor puro no plano abrindo. Desta forma, o critério de falha de deformação principal máxima de 2% é capaz de evitar a perda da estabilidade estrutural.

6.2 Carregamento de força normal pura

Os gráficos abaixo mostram as forças normais puras no plano máximas que as estruturas foram capazes de suportar segundo diferentes critérios de falha: deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural.

6.2.1 Fechando a estrutura

Como pode ser observado na Figura 106, ambas estruturas com raios de curvatura $R=3Dext$ e $R=5Dext$ quando submetidas ao carregamento de força normal pura no plano fechando sofreram deformação principal máxima sem perda da estabilidade estrutural para toda a faixa de λ .

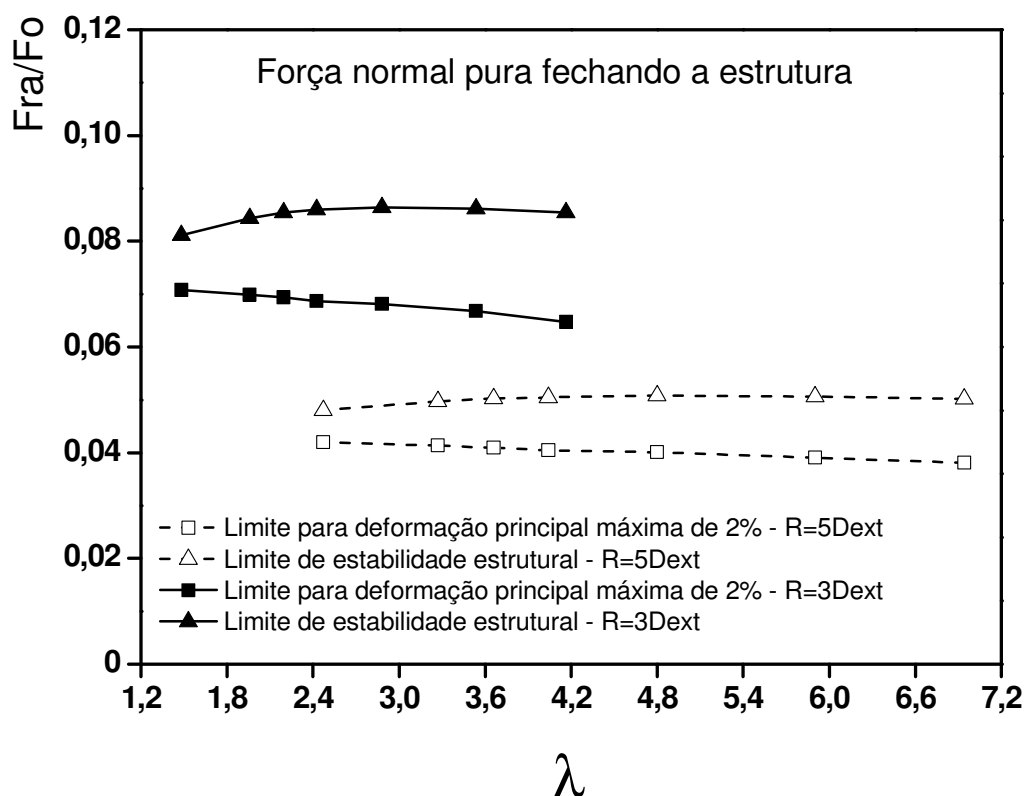


Figura 106 – Carregamentos máximos de forças normais puras no plano fechando as estruturas com raios de curvatura $R=3Dext$ e $R=5Dext$, em função de λ , os quais as estruturas são capazes de suportar segundo os critérios de falha de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural

Os estudos mostraram que as estruturas com raio de curvatura $R=3Dext$ requerem forças normais maiores para atingir a deformação principal máxima de 2% e o limite de estabilidade estrutural do que as estruturas com raio de curvatura $R=5Dext$.

6.2.2 Abrindo a estrutura

Como pode ser observado na Figura 107, ambas estruturas com raios de curvatura $R=3Dext$ e $R=5Dext$ quando submetidas ao carregamento de força normal pura no plano abrindo sofreram deformação principal máxima sem perda da estabilidade estrutural para toda a faixa de λ .

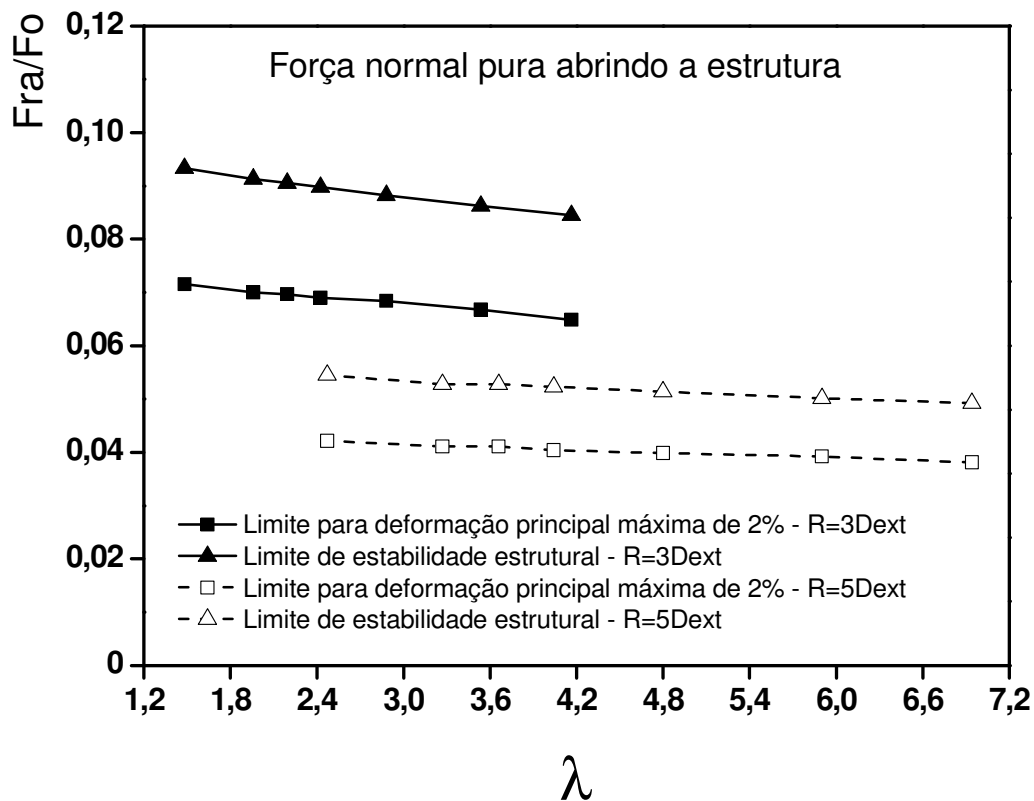


Figura 107 – Carregamentos máximos de forças normais puras no plano abrindo as estruturas com raios de curvatura $R=3Dext$ e $R=5Dext$, em função de λ , os quais as estruturas são capazes de suportar segundo os critérios de falha de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural

Os estudos mostraram que as estruturas com raio de curvatura $R=3Dext$ requerem forças normais maiores para atingir a deformação principal máxima de 2% e o limite de estabilidade estrutural do que as estruturas com raio de curvatura $R=5Dext$.

6.3 Carregamento de força cortante pura

Os gráficos abaixo mostram as forças cortantes puras no plano máximas que as estruturas foram capazes de suportar segundo diferentes critérios de falha: deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural.

6.3.1 Fechando a estrutura

Como pode ser observado na Figura 108, ambas estruturas com raios de curvatura $R=3Dext$ e $R=5Dext$ quando submetidas ao carregamento de força cortante pura no plano fechando sofreram deformação principal máxima sem perda da estabilidade estrutural para toda a faixa de λ .

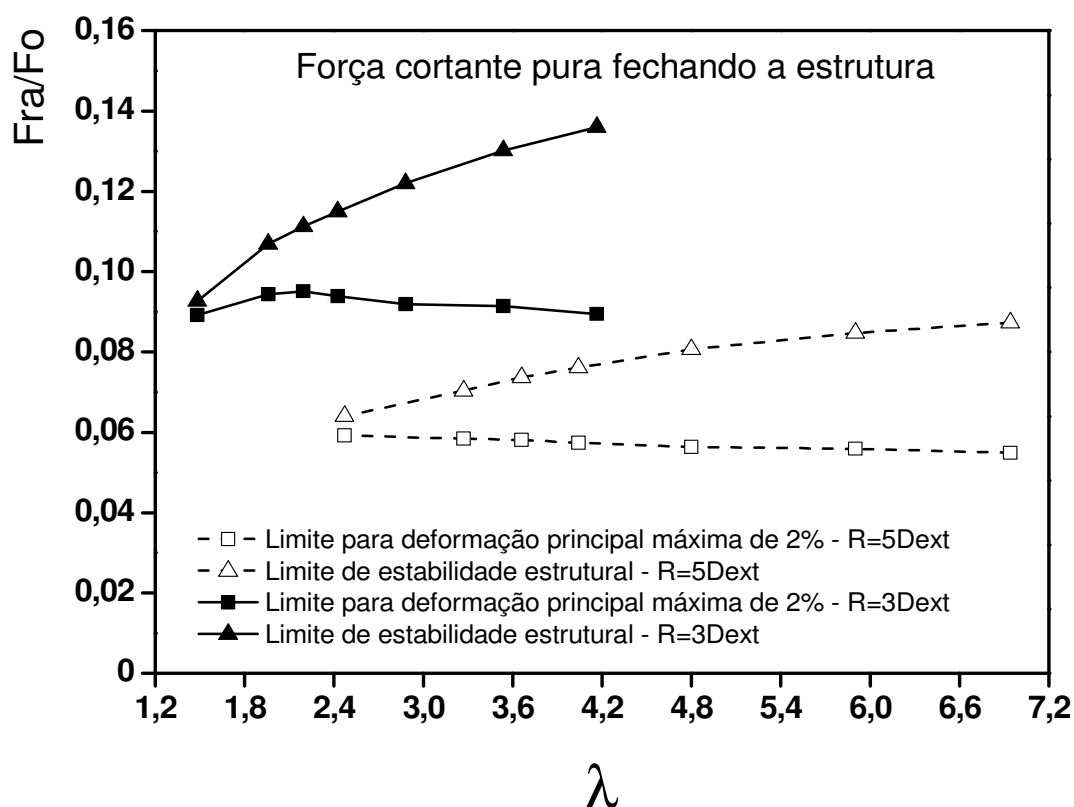


Figura 108 – Carregamentos máximos de forças cortantes puras no plano fechando as estruturas com raios de curvatura $R=3Dext$ e $R=5Dext$, em função de λ , os quais as estruturas são capazes de suportar segundo os critérios de falha de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural

Os estudos mostraram que as estruturas com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ requerem forças cortantes maiores para atingir a deformação principal máxima de 2% e o limite de estabilidade estrutural do que as estruturas com raio de curvatura $R=5D_{ext}$.

6.3.2 Abrindo a estrutura

Como pode ser observado na Figura 109, ambas estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$ quando submetidas ao carregamento de força cortante pura no plano abrindo sofreram deformação principal máxima sem perda da estabilidade estrutural para toda a faixa de λ .

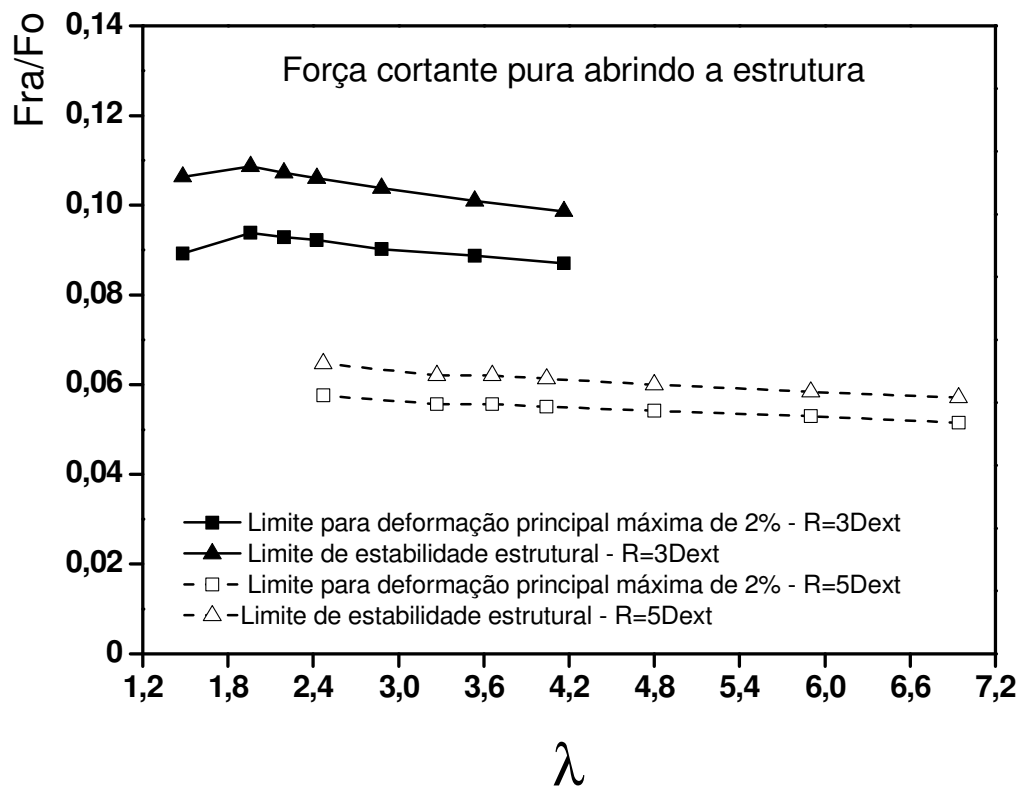


Figura 109 – Carregamentos máximos de forças cortantes puras no plano abrindo as estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$, em função de λ , os quais as estruturas são capazes de suportar segundo os critérios de falha de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural

Os estudos mostraram que as estruturas com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ requerem forças cortantes maiores para atingir a deformação principal máxima de 2% e o limite de estabilidade estrutural do que as estruturas com raio de curvatura $R=5D_{ext}$.

6.4 Resumo do estudo paramétrico de carregamento de força pura no plano abrindo e fechando as estruturas

Os estudos paramétricos de carregamento de força pura no plano abrindo ou fechando as estruturas mostraram que:

- a) As estruturas com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ requerem forças normais e cortantes maiores para atingir a deformação principal máxima de 2% e o limite de estabilidade estrutural do que as estruturas com raio de curvatura $R=5D_{ext}$;
- b) As estruturas requerem forças cortantes puras no plano maiores do que as forças normais puras no plano para atingir a deformação principal máxima de 2% e o limite de estabilidade estrutural tanto para o fechamento quanto para a abertura para ambos raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$;
- c) Ambas estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$ atingiram a deformação principal máxima de 2% antes da perda da estabilidade estrutural quando submetidas aos carregamentos de forças normal e cortante puras no plano tanto abrindo quanto fechando.

6.5 Carregamentos combinados

Assim como ocorreu para a estrutura analisada no item 5 acima cujo $\lambda=2.43$, as forças normal e cortante combinadas com o momento fletor reduziram a capacidade da estrutura suportar o momento fletor para as condições de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural para toda a faixa de λ .

As Figuras 110, 111, 112, 113, 114 e 115 mostram a influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação principal máxima de 2% e no momento fletor limite de estabilidade estrutural.

6.5.1 Fechando a estrutura

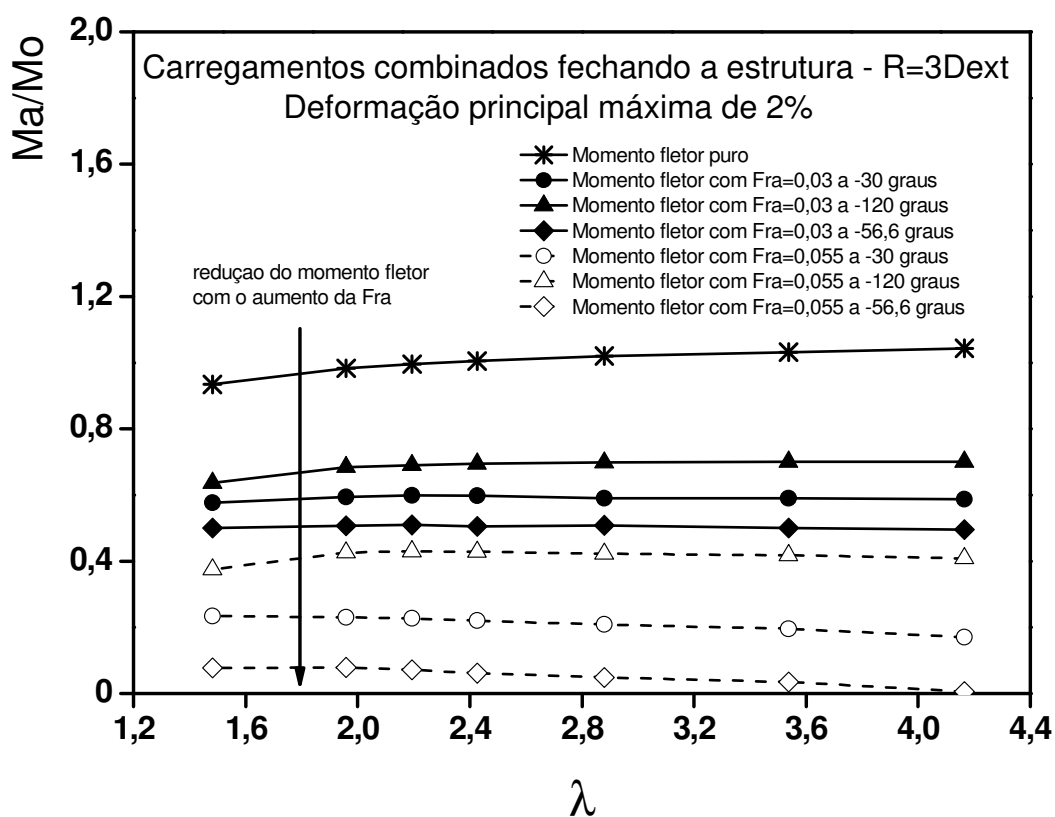


Figura 110 – Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação máxima principal de 2% no fechamento para estrutura com raio de curvatura R=3Dext

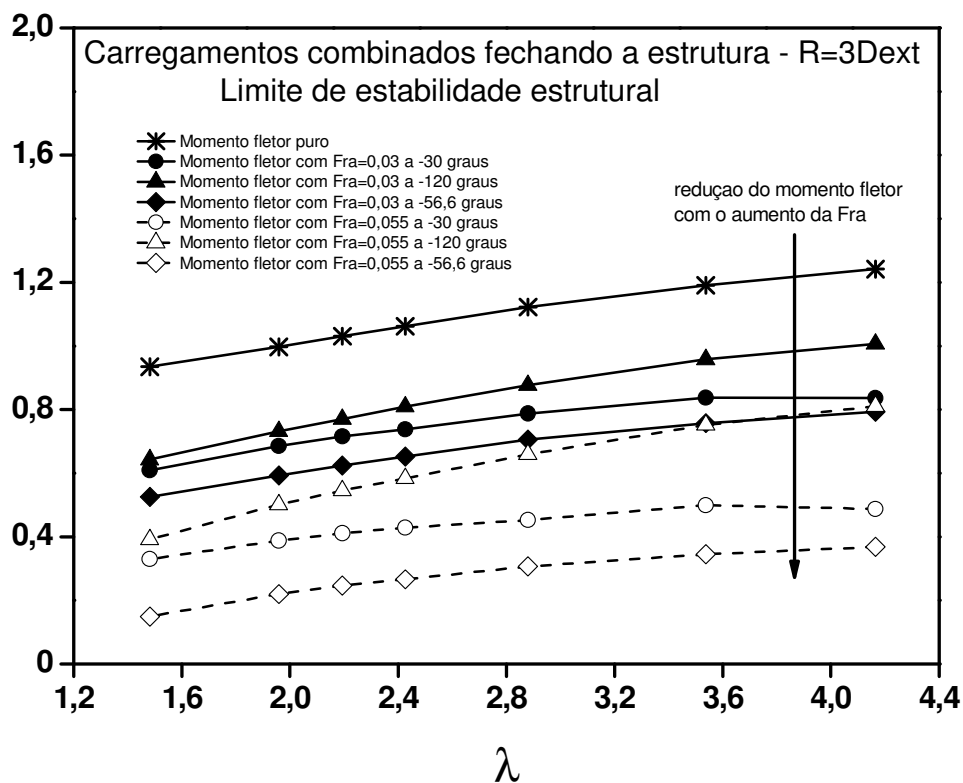


Figura 111 - Influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade no fechamento para estrutura com raio de curvatura R=3Dext

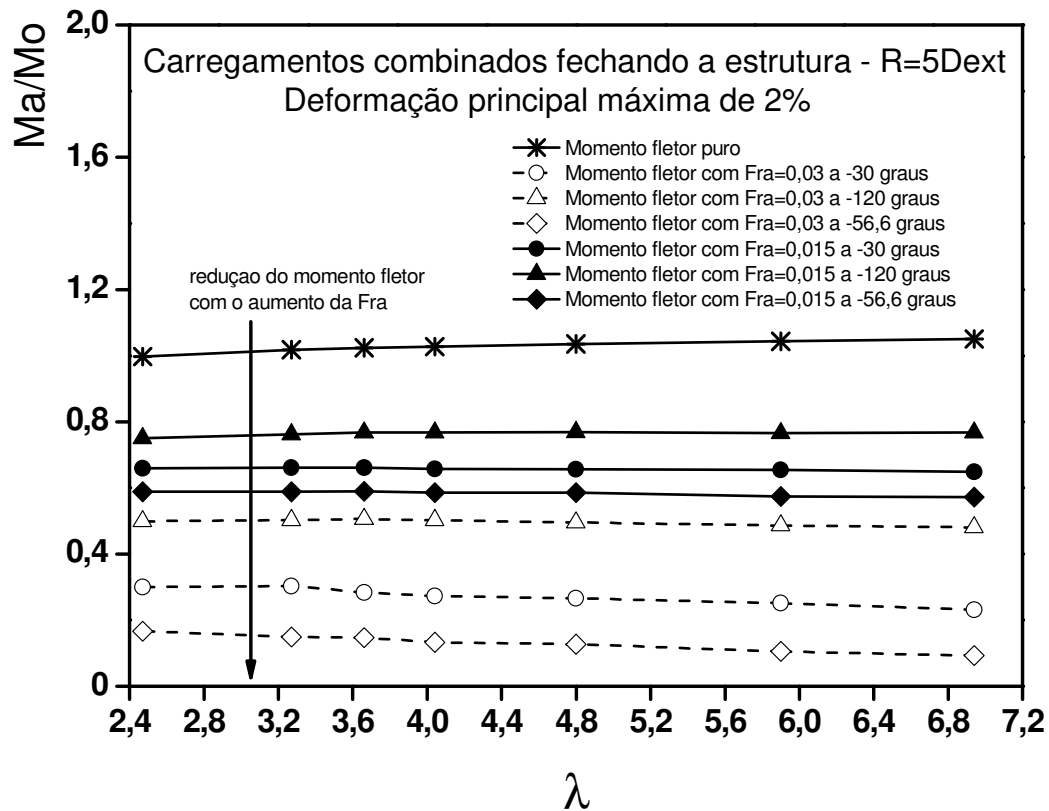


Figura 112 – Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação máxima principal de 2% no fechamento para estrutura com raio de curvatura R=5Dext

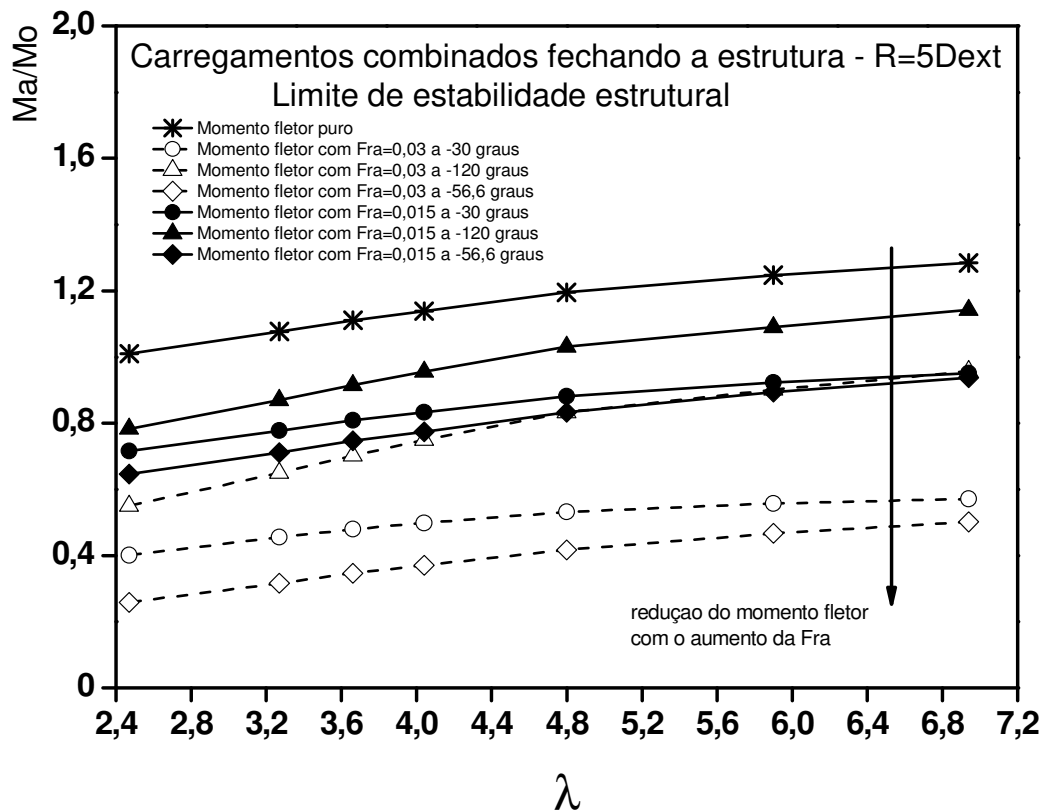


Figura 113 - Influência das forças normal e cortante no momento fletor limite de estabilidade no fechamento para estrutura com raio de curvatura R=5Dext

Como pode ser observado acima, as forças normal e cortante combinadas com o momento fletor reduzem a capacidade da estrutura em suportar o momento fletor e vice-versa.

Observa-se também que quanto maior foi a força resultante (Fra) maior foi a redução do momento fletor.

6.5.2 Abrindo a estrutura

Para a abertura são apresentados os gráficos para a influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação principal máxima de 2% para as estruturas com raio de curvatura $R=3Dext$ e $R=5Dext$.

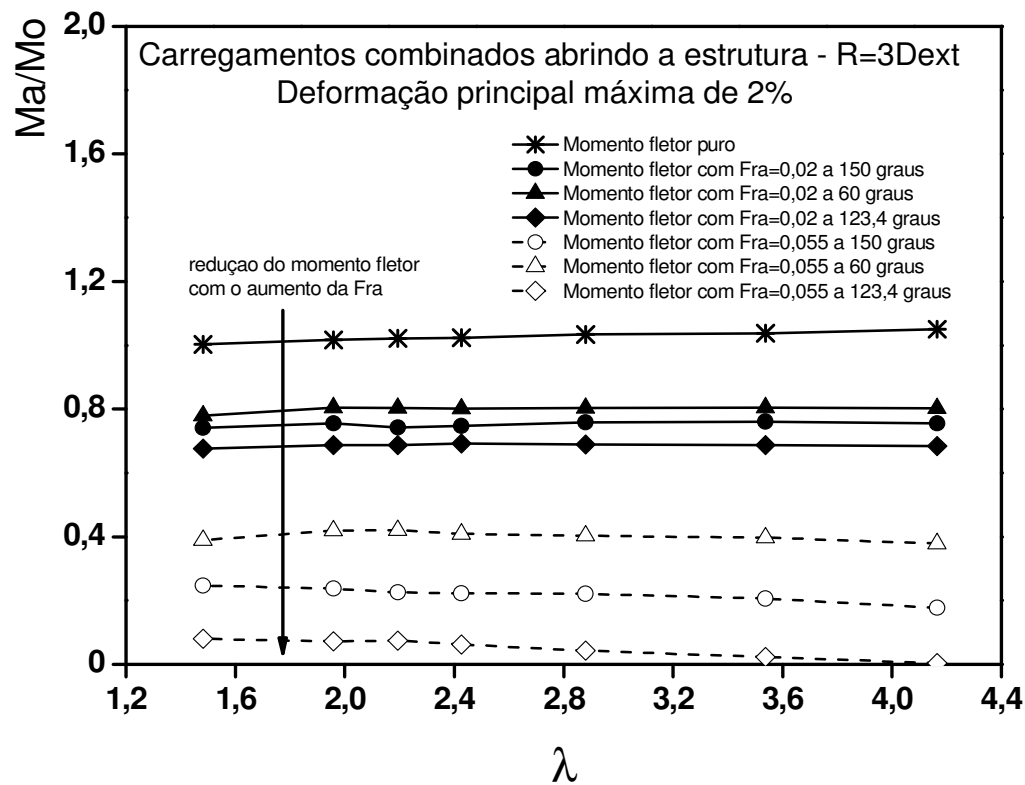


Figura 114 – Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação máxima principal de 2% na abertura para estrutura com raio de curvatura $R=3Dext$

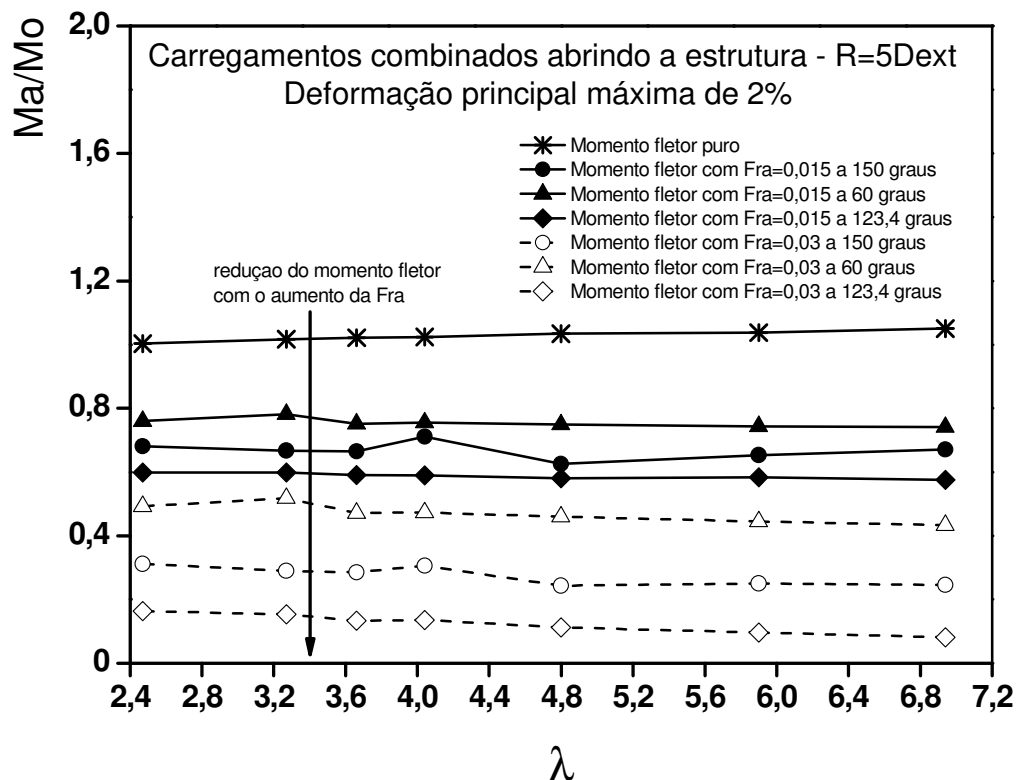


Figura 115 – Influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação máxima principal de 2% na abertura para estrutura com raio de curvatura R=5Dext

Como pode ser observado nos gráficos acima de carregamentos combinados abrindo e fechando, nos quais é mostrada a influência das forças normal e cortante no momento fletor que causa deformação principal máxima de 2%, quanto maior foi a força resultante maior foi a redução do momento fletor.

Com relação à influência no momento limite de estabilidade estrutural, vide explicação no item 5.3.3.2 acima.

7 Conclusões

A dissertação concentrou-se na identificação dos carregamentos no plano de momento fletor, força normal e força cortante, puros ou combinados entre si, abrindo ou fechando as estruturas, que provocassem deformações plásticas excessivas e a perda da estabilidade estrutural. Isto objetivando a comparar as deformações plásticas causadas pelos carregamentos com o critério de aceitação da Norma ISO 13628-7 [3] para deformação principal máxima.

Primeiramente avaliou-se os mecanismos de deformação das estruturas cilíndricas curvas com raios de curvatura de três e cinco vezes o diâmetro externo, com diâmetro interno de 6" e espessura de parede de 1,25" sujeitas a carregamentos puros e combinados tanto abrindo quanto fechando as estruturas. Em seguida realizou-se um estudo paramétrico para estruturas com outras geometrias, ou seja, para diferentes diâmetros e espessuras de parede.

I. Os resultados do estudo dos mecanismos de deformação das estruturas mostraram que:

a) Para carregamento de momento fletor puro no plano

- ✓ Na abertura são necessários carregamentos maiores do que no fechamento para causar os mesmos níveis de deformações plásticas e a perda da estabilidade estrutural. A estrutura com raio de curvatura $R=5D_{ext}$, com exceção do limite de estabilidade estrutural na abertura, requereu carregamentos maiores;
- ✓ As estruturas quando submetidas ao carregamento de momento fletor puro fechando são mais susceptíveis a perda da estabilidade estrutural do que quando submetidas ao carregamento de momento fletor puro abrindo. Entretanto, para que haja a perda da estabilidade estrutural na abertura é necessária a retificação da estrutura antes da perda da estabilidade, o que é muito improvável ocorrer em uma condição real para a estrutura cilíndrica curva de parede espessa de material aço;
- ✓ O critério de aceitação da norma ISO 13628-7 [3] para deformação principal máxima de 2% evita que a estrutura perca a estabilidade estrutural, entretanto deve-se verificar se a estrutura pode sofrer as

rotações da extremidade livre atingidas com a deformação principal de 2%.

b) Para carregamentos de forças normal e cortante puras no plano

- ✓ As estruturas com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ requereram forças normais e cortantes maiores para atingir as deformações e o limite de estabilidade estrutural do que as estruturas com raio de curvatura $R=5D_{ext}$;
- ✓ As estruturas requerem forças cortantes puras no plano maiores do que as forças normais puras no plano para atingir as mesmas deformações e o limite de estabilidade estrutural tanto para o fechamento quanto para a abertura para ambos raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$;
- ✓ O critério de aceitação da norma ISO 13628-7 [3] para deformação principal máxima de 2% evita que a estrutura perca a estabilidade estrutural, entretanto deve-se verificar se a estrutura pode sofrer as rotações da extremidade livre atingidas, na abertura e no fechamento, com a deformação principal de 2%.

c) Para carregamentos combinados de momento fletor, de força normal e força cortante

- ✓ Os momentos fletores que causam deformação principal máxima de 2% e perda estabilidade estrutural são reduzidos quando combinados com as forças normal e cortante tanto na abertura quanto no fechamento da estrutura;
- ✓ A menor redução dos momentos fletores que causam deformação principal máxima de 2% e perda da estabilidade estrutural ocorreu quando combinado somente com força cortante;
- ✓ No fechamento da estrutura, as combinações das forças normal e cortante $V=0,50xN$, $V=0,75xN$ e $V=N$ provocaram as maiores reduções do momento fletor que causa a deformação principal máxima de 2%,

enquanto que para o momento fletor limite de estabilidade as maiores reduções foram causadas pelas combinações $V=0,50xN$, $V=0,75xN$;

- ✓ Na abertura da estrutura, as combinações das forças normal e cortante $V=0,50xN$, $V=0,75xN$ e $V=N$ provocaram as maiores reduções do momento fletor que causa a deformação principal máxima de 2%;
- ✓ Na abertura da estrutura, para que ocorra a perda da estabilidade estrutural é necessária a retificação da estrutura antes da perda da estabilidade, o que é muito improvável ocorrer em uma condição real para a estrutura cilíndrica curva de parede espessa de material aço;
- ✓ O critério de aceitação da norma ISO 13628-7 [3] para deformação principal máxima de 2% evita que a estrutura perca a estabilidade estrutural, entretanto deve-se verificar se a estrutura pode sofrer as rotações da extremidade livre atingidas, na abertura e no fechamento, com a deformação principal de 2%.

II. Os resultados do estudo paramétrico mostraram que:

a) Para carregamento de momento fletor puro no plano

- ✓ Estruturas com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ para $\lambda \leq 1.96$ quando submetidas ao carregamento de momento fletor puro fechando, o critério de aceitação de deformação principal máxima de 2% deve ser aplicado em conjunto com o critério de perda da estabilidade, pois pode haver perda de estabilidade com menos de 2% de deformação principal máxima;
- ✓ Estruturas submetidas ao carregamento de momento fletor abrindo sofreram deformação principal máxima de 2% sem perda da estabilidade estrutural.

b) Para carregamentos de forças normal e cortante puras no plano

- ✓ As estruturas com raio de curvatura $R=3D_{ext}$ requerem forças normais e cortantes maiores para atingir a deformação principal máxima de 2%

e o limite de estabilidade estrutural do que as estruturas com raio de curvatura $R=5D_{ext}$;

- ✓ As estruturas requerem forças cortantes puras no plano maiores do que as forças normais puras no plano para atingir a deformação principal máxima de 2% e o limite de estabilidade estrutural tanto para o fechamento quanto para a abertura para ambos raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$;
- ✓ Ambas estruturas com raios de curvatura $R=3D_{ext}$ e $R=5D_{ext}$ atingiram a deformação principal máxima de 2% antes da perda da estabilidade estrutural quando submetidas aos carregamentos de forças normal e cortante puras no plano tanto abrindo quanto fechando.
- ✓ O critério de aceitação da norma ISO 13628-7 [3] para deformação principal máxima de 2% evita que a estrutura perca a estabilidade estrutural.

c) Para carregamentos combinados de momento fletor, de força normal e cortante no plano

- ✓ As forças normal e cortante combinadas com o momento fletor reduziram a capacidade da estrutura suportar o momento fletor para as condições de deformação principal máxima de 2% e limite de estabilidade estrutural para toda a faixa de λ e quanto maior foi a força resultante (F_{ra}) maior foi a redução do momento fletor.

III. Os resultados dos estudos possibilitam que:

- a) Uma vez conhecidos os carregamentos limites, combinados ou não entre si, e a influência de cada carregamento no comportamento da estrutura, pode-se projetar o pescoço de ganço de forma otimizada bem como os eventuais reforços necessários, identificados na análise da instalação do módulo de conexão vertical, de acordo com as combinações dos carregamentos que serão impostos pelo duto flexível; e
- b) Dentro da faixa das geometrias analisadas (parâmetro λ), pode-se, de maneira objetiva e rápida, identificar se determinados carregamentos impostos pelo duto flexível causaram deformações plásticas excessivas bem como a perda da estabilidade estrutural, utilizando os gráficos de influência das forças normal e cortante nos momentos fletores que causam deformação principal máxima de 2% e perda da estabilidade estrutural.

8 Recomendações para trabalhos futuros

Como recomendação para trabalhos futuros:

- a) Realização de estudos considerando outros materiais com diferentes limites de escoamento e encruamentos;
- b) Avaliação dos efeitos de ovalização, imperfeições iniciais e perda de espessura da parede no dobramento nos carregamentos máximos;
- c) Avaliação dos efeitos de entalhes concentradores de tensões nos carregamentos máximos;
- d) Avaliação dos efeitos de diferentes comprimentos retos de tubo no engaste nos carregamentos máximos;
- e) Avaliação do comportamento da estrutura para carregamentos fora do plano, ou seja, carregamentos que provoquem torção na estrutura;
- f) Avaliação do efeito da pressão interna nos carregamentos máximos; e
- g) Realização de estudo de fadiga da estrutura, considerando carregamentos cíclicos durante a instalação.

9 Referências

- [1] FMC TECHNOLOGIES. **Petrobras Roncador Brazil**. Disponível em: <<http://www.fmctechnologies.com/en/SubseaSystems/GlobalProjects/South%20America/Brazil/PetrobrasRoncador.aspx>>. Acesso em: 30 ago. 2015.
- [2] MORAIS, M. et al. **OTC 13258 - Deepwater Achievements and Challenges on the Extra Roncador Pipeline Installation**. Offshore Technology Conference. Houston, Texas: 2001.
- [3] ISO. **13628- Part 7 - Completion/workover riser system**. 2006.
- [4] ANSYS. Inc - **Release 16.2**.
- [5] MOURAD, H. M. **Elastic-plastic behavior and limit load analysis of pipe bends under out-ofplane moment loading and internal pressure**. The American University in Cairo - School of Sciences and Engineering. 1999. A Thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering.
- [6] BANTLIN, A. Formänderung und Beanspruchung federnder Ausgleichröhre, v. 54, p. 43-49, 1910.
- [7] KARAMANOS , S. A. Bending instabilities of elastic tubes. **International Journal of Solids and Structures**, 2002. 2059-2085. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/ijsolstr>.
- [8] SHALABY, M. A.; YOUNAN, M. Y. A. Nonlinear analysis and plastic deformation of pipe elbows subjected to in-plane bending. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 75, 1998. 603-611.
- [9] KARAMANOS, S. A.; TSOUVALAS, D.; GRESNIGT , M. Ultimate Bending Capacity and Buckling of Pressurized 90 deg Steel Elbows. **Journal of Pressure Vessel Technology**, 128, August 2006. 348-356. Disponível em: <<http://www.researchgate.net/publication/237900517>>.

- [10] YUN-JAE KIM, C.-S. O. Effects of attached straight pipes on finite element limit analysis for pipe bends. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 84, p. 177-184, 2007.
- [11] CALLADINE, C. Limit analysis of curved tubes. **J Mech Eng Sci**, v. 16(2), p. 85-7, 1974.
- [12] LI, J. et al. Plastic limit loads for pipe bends under combined bending and torsion moment. **International Journal of Mechanical Science**, v. 92, p. 133-145, 2015.
- [13] KIM, Y.; OH, C. Limit loads for pipe bends under combined pressure and in-plane bending based on finite element analysis. **Int J Press Vess Pip**, v. 83(2), p. 85-90, 2006.
- [14] GUO, C. **Plastic limit loads for surface defect pipes and bends under combined loads of tension, bending, torsion and internal pressure**. East Chine University of Science and Technology. 1999.
- [15] KIM, H. O. **Plastic Buckling of Pipes Under Bending and Internal Pressure**. Second (1992) International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco, USA: [s.n.]. 1992. p. 46-50.
- [16] LI, H.; MACKENZIE, D. Characterising plastic collapse of pipe bend structures. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 83, p. 85-95, 2006. Disponivel em: <WWW.ELSEVIER.COM/LOCATE/IJPVP>.
- [17] SMITSES, G. J.; HODGES, D. H. **Fundamentals of Structural Stability**. Elsevier.
- [18] NETTO, T. A. **Notas de aula**.
- [19] **ISO 13628- Part 4 - Subsea wellhead and tree equipment**. 2015.
- [20] **API 17D - Specification for Subsea Wellhead and Christmas Tree Equipment**. 2011.

- [21] **ASME B31.4 - Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids.** 2006.
- [22] **ASME B31.8 - Gas Transmission and Distribution Piping Systems.** 2007.
- [23] **ASME B31.3 - ASME Code for Pressure Piping.** 2008.
- [24] **ISO 13628 - Part 15 - Subsea structures and manifolds.** 2011.
- [25] **DNV OS-F101 - Submarine Pipeline Systems.** 2013.
- [26] **DNV RP-F112 - TECHNICAL REPORT - MATERIAL RISK - AGEING OFFSHORE.**
- [27] **API RP 1111 - Design, Construction, Operation, and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design).** 1999.
- [28] **DNV RP-D101 - Structural Analysis of Piping Systems.** 2008.
- [29] **API 17R - Recommended Practice for Flowline Connectors and Jumpers.** 2015.
- [30] **API 6A - Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment.** 2004.
- [31] **API 6X - Design Calculations for Pressure-containing Equipment.** 2014.
- [32] **ASME Section VIII – Division 2 - Alternative Rules.** 2010.
- [33] **ASME Section VIII - Division 3 - Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels.** 2010.